



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
2016

**Marco João Ferreira
Vilaça**

MAQUINABILIDADE DOS AÇOS AISI H13 E D2



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
2016

**Marco João Ferreira
Vilaça**

MAQUINABILIDADE DOS AÇOS AISI H13 E D2

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais por tudo o que fizeram por mim nesta enorme caminhada.

O júri

Presidente

Professor Doutor António Manuel Godinho Completo

Professor Auxiliar com Agregação da Universidade de Aveiro

Arguente

Professor Doutor Carlos Alberto Da Conceição António

Professor Associado com Agregação da Universidade do Porto

Orientador

Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva

Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, pelos conselhos e ensinamentos ao longo de todo o curso e da dissertação.

Ao Engenheiro António Festas, por toda a ajuda prestada na execução experimental do projeto e retirar todas as dúvidas.

Ao Engenheiro Carlos Lauro por toda a informação e conhecimento fornecidos.

À F. Ramada, que forneceu o material para testes.

À Sandvik, pelo fornecimento das ferramentas de corte.

Aos meus pais, simplesmente por tudo! Muito OBRIGADO!

À minha irmã, Elsa, por me apoiar e me ter amparado sempre que precisei, tanto ao nível académico como pessoal.

A toda a minha família mais chegada, por me ajudarem sempre que precisei e me darem bons conselhos.

Aos meus amigos da faculdade, que ficarão para a vida.

Palavras-chave

Aços AISI H13 e D2, maquinabilidade, torneamento, *hard turning*, ferramentas de corte, acabamento superficial, *wiper*.

Resumo

No presente trabalho foi realizado um estudo baseado na maquinabilidade, através do acabamento superficial e da precisão dimensional, dos aços AISI H13 e D2, utilizando ferramentas cerâmicas de geometria convencional e *wiper*. Recorrendo a ensaios de torneamento exterior a seco foi avaliado o acabamento superficial das peças, analisando-se os valores de rugosidade nomeadamente Ra, Rt, Ra/Rt e de intervalo de tolerância avaliando-se a precisão dimensional. Concluiu-se que o tratamento térmico aplicado aos aços permite obter valores mais baixos de acabamento superficial e que as pastilhas de geometria *wiper* apresentam uma vantagem relativamente as pastilhas convencionais pois com avanços elevados conseguem-se valores de rugosidade baixos.

Keywords

AISI H13 and D2 steel, machinability, turning, cutting tools, surface finish, *wiper*.

Abstract

In this work was carried out a study based on the machinability, analysing the surface and dimensional accuracy, of AISI H13 and D2 steels, with conventional and *wiper* ceramic tools.

The surface finishing was evaluated through the roughness values, Ra, Rt, Ra / Rt and values of the tolerance interval.

It was concluded that the hardness materials to the steels allows lower values of surface finish. Furthermore the wiper tools was more advantageous than the conventional tools because with the increase of the production rate the roughness values trended to reduce.

ÍNDICE

Lista de figuras	iii
Lista de tabelas	v
Lista de símbolos e abreviaturas.....	vii
1 Introdução	3
1.1 Objetivos do trabalho	4
1.2 Estrutura do trabalho	4
2 Maquinabilidade dos aços AISI H13 e D2 - Estado da arte	9
2.1 Maquinagem de altas velocidades.....	9
2.2 Torneamento de componentes endurecidos	9
2.3 Aços AISI H13 e D2	10
2.3.1 Enquadramento.....	10
2.3.2 Propriedades mecânicas	12
2.3.3 Tratamentos térmicos aplicados aos aços.....	12
2.4 Maquinagem de aços	14
2.4.1 Parâmetros e ferramentas de corte.....	14
2.4.1.1 Parâmetros de corte	14
2.4.1.2 Ferramentas de corte	15
2.5 Condições de corte testadas.....	16
2.6 Maquinabilidade.....	17
2.6.1 Desgaste e vida da ferramenta de corte	17
2.6.2 Rugosidade/ precisão dimensional	18
2.6.3 Forças de maquinagem.....	22
2.6.4 Temperatura de corte.....	23
2.6.5 Vibrações.....	24
2.6.6 Taxa de produção	25
2.6.7 Tecnologia <i>wiper</i>	25
2.7 Síntese	26
3 Metodologia experimental	29
3.1 Materiais ensaiados	29
3.2 Ferramentas de corte	30
3.3 Máquina-ferramenta	32
3.4 Parâmetros de corte utilizados.....	32
3.4.1 Estratégias de corte.....	33
3.5 Critérios de avaliação da maquinabilidade utilizados	34
3.5.1 Medição da rugosidade superficial.....	34

3.6	Síntese	35
4	Análise e discussão de resultados	39
4.1	Influência do tratamento térmico e da tecnologia <i>wiper</i> no acabamento superficial/ precisão dimensional	39
4.1.1	Variação do avanço (f)	39
4.1.2	Variação da velocidade de corte (V_c)	46
4.2	Taxa de produção	51
5	Conclusões.....	55
5.1	Trabalhos futuros.....	56
	Referências	59
	ANEXO I - Síntese de vários estudos sobre os valores de Ra obtidos nos aços AISI H13 e D2.	65
	ANEXO II – Características do torno CNC Kingsbury MPH 50.	69
	ANEXO III – Valores e classes de IT normalizados, valores obtidos nos ensaios experimentais e erro dos apalpadores.	71
	ANEXO IV - Descrição da referência das pastilhas de corte	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Aplicações possíveis dos aços-ferramenta: a) Molde de trabalho a quente, b) Molde de trabalho a frio.	3
Figura 2.1 - Formas disponíveis de comercialização dos aços.....	11
Figura 2.2 - Ciclo de tratamento térmico para aço AISI H13 (Soares, 2009).	13
Figura 2.3 - Ciclo do tratamento térmico para aço AISI D2.	13
Figura 2.4 - Desgaste da ferramenta de corte na maquinagem (Sandvik, 2010).	17
Figura 2.5 - Rugosidade média aritmética R_a (Agostinho <i>et al.</i> , 1995).	19
Figura 2.6 - Altura das irregularidades dos 10 pontos R_z (Agostinho <i>et al.</i> , 1990).	20
Figura 2.7 - Amplitude máxima da rugosidade “ R_t ” (Agostinho <i>et al.</i> , 1990).	20
Figura 2.8 - Componentes da força de maquinagem em operações de torneamento (Ozel <i>et al.</i> , 2000).	23
Figura 2.9 - Geometrias das ferramentas de corte: (a) Geometria convencional, (b) Geometria <i>wiper</i> (W. Grzesik, 2008).	25
Figura 3.1 - Provetes utilizados nos ensaios: a) Aço AISI D2 (260 HB), b) Aço AISI D2 (54HRC), c) Aço AISI H13 (255 HB), d) Aço AISI H13 (60 HRC).	30
Figura 3.2 - Ferramentas de corte utilizadas nos ensaios: a) porta-ferramenta pastilha DCLNL 2020K 12, b) fixação da pastilha por grampo, c) pastilhas CNGA 120408 T01020 e CNGA 120408 T01020 WG, cortesia Sandvik.	31
Figura 3.3 - Torno CNC Kingsbury MHP 50 utilizado nos ensaios.	32
Figura 3.4 - Representação esquemática dos ensaios de avaliação de rugosidade.	33
Figura 3.5 - Representação do rugosímetro em medição.	34
Figura 3.6 - Esquema de medição da rugosidade ao longo dos provetes de ensaio.	35
Figura 3.7 - Organograma do procedimento experimental executado na presente dissertação.	35
Figura 4.1- Evolução da rugosidade média aritmética (R_a) em função do avanço para a velocidade de corte (V_C) de 100 m/min nos diferentes aços.	40
Figura 4.2 - Evolução da amplitude máxima rugosidade (R_t) em função do avanço para a velocidade de corte (V_C) de 100 m/min nos diferentes aços.	42
Figura 4.3 – Razão entre R_a e R_t em função do avanço para os diferentes aços.	44
Figura 4.4 - Evolução de IT em função do avanço para a velocidade de corte (V_C) de 100 m/min nos diferentes aços.	45
Figura 4.5 – Evolução da rugosidade média aritmética (R_a) em função da velocidade de corte (V_C) para o avanço fixo de 0,10 mm/rot nos diversos aços.	47
Figura 4.6 – Evolução da amplitude máxima de rugosidade (R_t) em função da velocidade de corte (V_C) para o avanço fixo de 0,10 mm/rot nos diferentes aços.	48
Figura 4.7 – Razão entre R_a e R_t em função da velocidade de corte (V_C) para os aços em estudo.	49
Figura 4.8 - Evolução de IT em função da velocidade de corte (V_C) para o avanço fixo de 0,10 mm/rot nos diferentes aços.	50
Figura 4.9 – Evolução da rugosidade media aritmética (R_a) em função da taxa de produção (T_p) nos diferentes aços.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Designação do aço AISI H13 nas diversas normas.....	11
Tabela 2.2 - Designação do aço AISI D2 nas diversas normas.....	11
Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas do aço AISI H13 tratado termicamente.	12
Tabela 2.4 - Propriedades mecânicas do aço AISI D2 tratado termicamente.	12
Tabela 2.5 - Parâmetros de corte recomendados para o torneamento de aços (Sandvik, 2008).....	14
Tabela 2.6 - Parâmetros de corte recomendados para o torneamento de diversos aços.	16
Tabela 2.7 - Valores de rugosidades nas diversas aplicações.	22
Tabela 3.1 - Composição química do aço AISI H13 (% em peso).....	29
Tabela 3.2 - Composição química do aço AISI D2 (% em peso).....	29
Tabela 3.3 - Identificação e geometria das ferramentas utilizadas nos ensaios.	31
Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados no primeiro teste.	32
Tabela 3.5 - Parâmetros utilizados no segundo teste.....	33
Tabela 4.1- Aços e o seu tratamento térmico.	39
Tabela A.I.1 – Estudos da maquinabilidade dos aços AISI H13 e D2.....	65
Tabela A.II.1 - Características do torno CNC Kingsbury MPH 50.....	69
Tabela A.III.1 - Valores de IT normalizados para um diâmetro nominal entre 30 e 50 mm.	71
Tabela A.III.2 - Valores de IT normalizados para um diâmetro nominal entre 50 e 80 mm.	71
Tabela A.III.3 - Classes de qualidade IT.....	71
Tabela A.III.4 – Valores teóricos de Rt e Ra para os avanços e ferramentas selecionadas.	71
Tabela A.III.5 – Cálculo do erro apalpador 1.....	72
Tabela A.III.6 – Cálculo do erro apalpador 2.....	72
Tabela A.III.7 – Valores da taxa de produção (Tp).....	72
Tabela A.III.8 - Parâmetros de rugosidade e IT obtidos com a velocidade de corte (V_C) fixa de 100 m/min com a ferramenta cerâmica de geometria convencional.	73
Tabela A.III.9 - Parâmetros de rugosidade e IT obtidos com a velocidade de corte (V_C) fixa de 100 m/min com a ferramenta cerâmica de geometria <i>wiper</i>	74
Tabela A.III.10 - Parâmetros de rugosidade e IT obtidos com o avanço (f) fixo de 0,10 mm/rot com a ferramenta cerâmica de geometria convencional.	75
Tabela A.III.11 - Parâmetros de rugosidade e IT obtidos com o avanço (f) fixo de 0,10 mm/rot com a ferramenta cerâmica de geometria <i>wiper</i>	75

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AISI	American Iron and Steel Institute
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio (alumina)
a _p	Profundidade de corte
C	Carbono
CBN	Nitreto cúbico de boro
CM	Cerâmica mista
CNC	Comando numérico computadorizado
Co	Cobalto
Cr	Crômio
cv	Cavalo-vapor
CVD	<i>Chemical vapour deposition</i>
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
<i>et al.</i>	e outros (do Latim <i>et alii</i>)
f	Avanço
Fa	Força de avanço
FANUC	<i>Fujitsu Automated Numerical Control</i>
Fc	Força de corte
Fa _p	Força de penetramento
Fe	Ferro
Fm	Força de maquinagem
Fx	Força de penetramento
Fy	Força de avanço
Fz	Força de corte
GPa	Giga Pascal
HB	Dureza Brinell
HM	<i>Hard machining</i>
HRC	Dureza Rockwell “C”
HSM	<i>High speed machining</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IT	Intervalo de tolerância
K	Razão entre Ra e Rt
kW	kiloWatt
Lc	Cut-off
Lt	Comprimento total de palpagem
m/min	Metro por minuto
mm	Milímetro
mm/rot	Milímetro por rotação
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MPa	Mega Pascal

N	Azoto
N/mm ²	Newton por milímetro quadrado
nm	Nanómetro
P	Fósforo
PCBN	Nitreto de boro policristalino
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i>
R	Rugosidade
Ra	Rugosidade média aritmética
RmD	Rugosidade média norma DIN
RmJ	Rugosidade média norma Japonesa
Rp	Profundidade média de aplainamento
rpm	Rotação por minuto
Rq	Rugosidade média geométrica
Rt	Amplitude máxima da rugosidade
Rta	Rugosidade média aritmética teórica
Rtt	Amplitude máxima da rugosidade teórica
Rz	Profundidade média da rugosidade
RzD	Profundidade média da rugosidade norma DIN
RzI	Profundidade média da rugosidade norma ISO
RzJ	Profundidade média da rugosidade norma Japonesa
r _e	Raio de curvatura da ponta
s	segundo
S	Enxofre
S _{apara}	Secção de apara
Si	Silício
Si ₃ N ₄	Nitreto de silício
T	Temperatura
TiC	Carboneto de Titânio
TiN	Nitreto de titânio
ton.	Tonelada
Tp	Taxa de produção
UA	Universidade de Aveiro
V	Vanádio
V _B	Desgaste na face de saída
V _{Bmáx}	Desgaste máximo na face de saída
V _c	Velocidade de corte
α	Ângulo de saída
°C	Graus Celsius
μ m	Micrómetro
%	Porcentagem
γ	Ângulo de ataque da ferramenta
χ	Ângulo de posição da ferramenta
λ_s	Ângulo de inclinação

Capítulo 1

Introdução

1 INTRODUÇÃO

O constante desenvolvimento da sociedade e a procura de componentes que satisfaçam as suas necessidades fazem com que seja necessário uma maior aposta na investigação quer dos materiais quer dos processos de fabrico dos componentes desejados. A remoção de material por processos de corte por arranque de apra permite alcançar formas desejadas com elevada precisão que seriam impensáveis obter de outro modo. Stephenson e Agapiou (2005) definiram o processo de corte de metais, vulgarmente chamado de processo de maquinagem, como sendo um processo industrial em que as peças que se pretendem fabricar são obtidas pela remoção do material indesejado, sob a forma de aparas.

Quando os materiais são maquinados através de vários processos verificam-se propriedades muito diferentes, sendo desta forma a sua maquinabilidade bastante ampla dependendo das condições de corte e do tipo de operação de maquinagem (Hoseiny *et al.* 2011).

O principal objetivo dos estudos de maquinabilidade é relacionar as condições de corte (velocidade de corte, avanço, penetramento, tipo de material e geometria da ferramenta) com alguns aspetos que condicionam o processo (forças de corte, desgaste da ferramenta, acabamento superficial, precisão dimensional, custo e taxa de produção).

Com as recentes melhorias das máquinas operatrizes, dos materiais e das geometrias das ferramentas, a maquinagem de materiais endurecidos tem ganho bastante interesse.

Os aços-ferramenta são os materiais selecionados para a construção dos componentes funcionais dos moldes e matrizes porem, têm sido implementadas algumas ligas de alumínio em aplicações específicas para esses componentes em moldes para injeção (Unger, 2006).

Nas Figura 1.1 ilustram-se algumas das aplicações possíveis dos aços-ferramenta segundo a empresa Topstechtool¹.

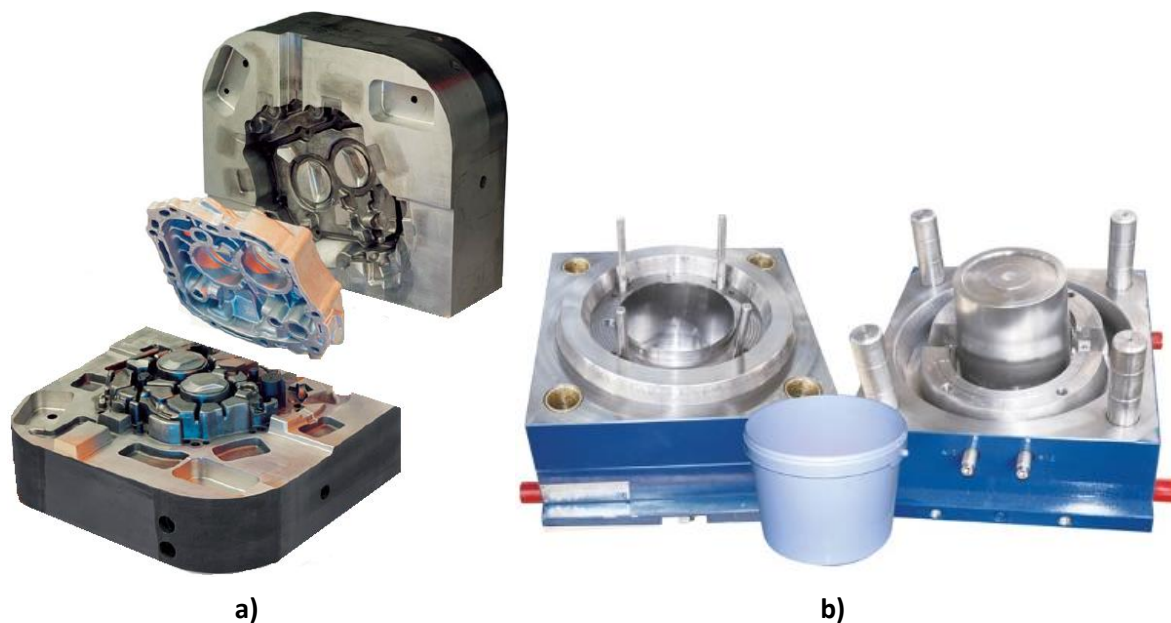


Figura 1.1 - Aplicações possíveis dos aços-ferramenta: a) Molde de trabalho a quente, b) Molde de trabalho a frio.

¹ http://www.topstechtool.com/tool_steels.html

Com o aperfeiçoamento dos materiais de ferramentas ditos “avançados” como o CBN e os cerâmicos, simultaneamente com o avanço na manufatura de máquinas ferramentas mais rígidas, computadorizadas e com tolerância extremamente precisa, a operação de torneamento de aços endurecidos tem-se considerado comum. Com a inovação das ferramentas de geometrias alisadoras (*wiper*), tornou-se possível atingir um acabamento de alta qualidade em operações de torneamento quando comparadas com ferramentas convencionais. Para alguns casos, o acabamento também se pode manter para avanços maiores do que os comuns, conduzindo a um aumento da produtividade (Sandvik, 2010).

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

A presente dissertação tem como principal objetivo avaliar a maquinabilidade, através do acabamento superficial e da precisão dimensional dos aços AISI H13 e D2 recozidos e tratados termicamente (têmpera e revenido) recorrendo á realização de ensaios de torneamento exterior a seco, utilizando ferramentas de corte cerâmicas (Al_2O_3 / TiN/ TiC) de geometria convencional e *wiper*.

Esta análise é feita tendo como alvo os seguintes objetivos:

- Avaliar o efeito do tratamento térmico no acabamento superficial/ precisão dimensional;
- Analisar o efeito dos parâmetros de corte no acabamento superficial/ precisão dimensional;
- Comparar os valores obtidos do acabamento das superfícies/ precisão dimensional nos aços de trabalho a quente e frio (AISI H13 e D2);
- Avaliar o acabamento superficial em função da taxa de produção.

Com base nos objetivos anteriormente enunciados, pretende-se ainda realizar uma avaliação do desempenho das ferramentas de geometria convencional em comparação com as ferramentas de geometria *wiper*, no torneamento dos diversos aços.

As ferramentas *wiper* utilizam tecnologia de raio de ponta múltiplo. Segundo os fabricantes, esta tecnologia permite obter um melhor acabamento de superfície quando comparado com as ferramentas convencionais. Estes afirmam ainda que utilizando uma gama de avanço duas vezes superior é possível obter um acabamento de superfície com a mesma qualidade. Do ponto de vista económico revela-se desta forma um meio para aumentar a produtividade nos processos de maquinagem.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos, onde cada um deles representa uma continuação do anterior.

No **capítulo 1 “Introdução”** está inserida a presente introdução onde é indicado o tema a explorar, a área onde este se inclui, os objetivos a que se propõe esta dissertação e descrita a organização da mesma.

O **capítulo 2 “Maquinabilidade dos aços AISI H13 e D2”** descreve a revisão bibliográfica realizada, isto é, são analisados aspetos relevantes sobre os aços em estudo nomeadamente, os aço AISI H13 e D2 e descritos alguns resultados de trabalhos efetuados anteriormente por diversos autores na área da maquinabilidade de aços. São também analisados aspetos relevantes das pastilhas em estudo desde a sua composição até a sua geometria, e ilustrados alguns materiais que foram maquinados pelas mesmas.

No **capítulo 3 “Metodologia experimental”** é descrito todo o procedimento experimental realizado ao longo da dissertação, procedimento esse que vai desde o material e máquina utilizados até à descrição pormenorizada de cada tipo de ensaios, bem como dos equipamentos utilizados.

No **capítulo 4 “Análise e discussão de resultados”** são apresentados os resultados obtidos dos ensaios experimentais e posteriormente analisados e discutidos. Pretende-se analisar essencialmente o efeito do tratamento térmico aplicado aos aços e a geometria das pastilhas com base nos parâmetros de rugosidades, o grau de tolerância (IT), e a taxa de produção. Os resultados são apresentados sob a forma de gráficos para melhor compreensão, sendo complementados por tabelas existentes em anexos. As análises e discussões são apresentadas de forma que seja simplificada a comparação das geometrias das pastilhas.

O **capítulo 5 “Conclusões”** apresenta as principais conclusões retiradas dos ensaios experimentais, indicando ainda algumas perspectivas futuras para trabalhos a realizar nesta área.

A metodologia utilizada para a elaboração da presente dissertação foi o método descritivo, expositivo, experimental, crítico-reflexivo e pesquisa bibliográfica.

Este percurso é encerrado com a apresentação das referências utilizadas na elaboração desta dissertação, assim como dos anexos elaborados.

Capítulo 2

Maquinabilidade dos aços AISI
H13 e D2 – Estado da arte

2 MAQUINABILIDADE DOS AÇOS AISI H13 E D2 - ESTADO DA ARTE

Este capítulo visa a contextualização teórica sobre o tema abordado, maquinabilidade dos aços AISI H13 e D2, acedendo para isso a recursos bibliográficos, tais como artigos, livros revistas ou teses.

2.1 MAQUINAGEM DE ALTAS VELOCIDADES

A maquinagem de altas velocidades (*high speed machining* - HSM) é conhecida como um dos mais efetivos processos de manufatura e de prototipagem rápida que proporciona uma excelente qualidade de forma e dimensão. De acordo com Silva (2002) entende-se por maquinagem de altas velocidades o processamento de materiais com velocidades de corte e taxas de avanço aumentadas por um fator de 5 até 8 relativamente às velocidades de corte e avanços convencionais. Para além, da velocidade de corte, fatores como máquina-ferramenta, material e forma da peça a ser maquinada interagem com o objetivo de obter resultados específicos nas operações de maquinagem (Shin *et al.*, 2003; Santos *et al.*, 2003; Schulz e Moriwaki, 1992).

Conforme Silva (2002) as ferramentas de corte ao serem utilizadas em processos HSM devem ter aspetos de projeto e fabrico visando atuar basicamente em quatro aspetos: material da ferramenta (base e revestimento), geometria, sistema de fixação máquina-ferramenta e *design*.

A compreensão dos diferentes elementos relacionados com o processo HSM (desgaste de ferramentas, estratégias de corte, vibrações, sistemas de fixação da peça e ferramenta) pode contribuir fortemente para a redução do tempo e dos custos do processo bem como para a melhoria da qualidade das peças, uma melhor utilização das ferramentas e das máquinas-ferramentas e promover uma melhor segurança do operador.

2.2 TORNEAMENTO DE COMPONENTES ENDURECIDOS

A maquinagem de materiais endurecidos (*hard machining* - HM), feita com ferramentas cerâmicas (para materiais com dureza entre 40 e 60 HRC) ou de CBN (para materiais com dureza entre 60 e 70 HRC) (Özel *et al.*, 2007), pode frequentemente reduzir custos de fabrico, diminuir o tempo de produção (*lead-time*), melhorar a qualidade do produto e oferecer maior flexibilidade ao processo.

Um dos processos mais utilizados para a maquinagem de materiais endurecidos é o torneamento. O torneamento de materiais endurecidos (*hard turning*) exige alguns requisitos especiais, como por exemplo, ferramentas de corte de alta dureza e resistentes a altas temperaturas e máquinas-ferramenta que atinjam alta rotação com elevada precisão e rigidez. Este processo de corte por arranque de apara pode ser utilizado nas mais diversas aplicações, tais como engrenagens, eixos, rolamentos, cames, peças forjadas, moldes e matrizes, o que reduz significativamente os custos de produção, prazos de entrega e melhora a qualidade geral do produto (Zou, 2004; Rech J, 2003; Destefani J e Elbestawi, 1997).

A ampla variedade de aços-ferramenta empregados no torneamento de materiais endurecidos é outro aspeto a ser considerado na manufatura. Existe a possibilidade da utilização de um mesmo aço-ferramenta com diferentes propriedades em dependendo do tratamento térmico escolhido. Para forjamento e fundição são selecionados, geralmente, aços-ferramenta para trabalho a quente (série H), os quais podem resistir às temperaturas envolvidas no processo, tipicamente entre 315 a 650 °C. Entre eles estão o H13 (alto teor de cromo) e H21 (alto teor de tungstênio), que são utilizados com dureza entre 45 a 56 HRC. A diversidade de aços utilizados na área de moldes para injeção de plásticos reflete a variedade de plásticos que podem ser processados. Para ferramentas de

estampagem, os aços-ferramenta A2, D2, D4, M2 e M4 são utilizados com dureza superior a 58 HRC (Fallbohmer *et al.*, 2000; Dewes e Aspinwall, 1997; Rorberts e Cary, 1992).

Para obter resultados satisfatórios na maquinagem de materiais endurecidos com uma ferramenta de geometria definida, devem ser obedecidos os seguintes requisitos (Bartarya e Choudhury, 2011):

- A máquina-ferramenta deve garantir elevada rigidez, velocidade e exatidão.
- Devem ser utilizadas ferramentas com dureza superior ao material maquinado e com elevada resistência ao desgaste.
- A maquinagem de materiais endurecidos é feita sem o uso de fluídos de corte.
- A alta temperatura atingida facilita o corte do material (quando feita sem fluído), além de reduzir custos de fabricação e de impacto ambiental.

O uso de fluído de corte no torneamento de aços endurecidos diminui a vida da ferramenta em relação ao corte a seco (Diniz, Ferreira e Teixeira filho, 2003). Na condição a seco, evitam-se também sérios inconvenientes quanto ao manuseio, manutenção e descarte de fluídos, que vêm causar poluição da água e do solo, além de acarretar danos na saúde do ser humano (Teixeira Filho, 2000).

Thiele e Ozel (2000), identificaram vários fatores que afetam as forças de corte, a rugosidade superficial e o desgaste da ferramenta através da realização de diversas experiências no torneamento de aços endurecidos utilizando ferramentas CBN. O efeito da microestrutura de aços endurecidos sobre os mecanismos de desgaste da ferramenta foi estudada por Poulachon (2003).

Benga e Abrao (2003) e Kumar *et al.* (2003) observaram uma melhor qualidade de superfície no torneamento de componentes de aço endurecidos utilizando ferramentas cerâmicas de alumina/carboneto de titânio ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$).

Uma das desvantagens da maquinagem de materiais endurecidos está diretamente ligada à integridade superficial da peça após o corte, campos de tensões residuais indesejáveis e alterações de microestrutura superficial (formação de camada branca, por exemplo) (Grzesik, 2008).

Davim e Figueira (2007) investigaram a influência da velocidade de corte e do avanço no desgaste de flanco, na pressão específica de corte e na rugosidade superficial no torneamento do aço AISI D2 endurecido para trabalho a frio com pastilhas cerâmicas convencionais.

2.3 AÇOS AISI H13 E D2

2.3.1 Enquadramento

Dos materiais encontrados no nosso dia-a-dia, grande parte são conhecidos como metais, embora, quase na totalidade, estes sejam ligas metálicas. Uma liga consiste na união de dois ou mais elementos químicos onde pelo menos um é metálico e todas as fases existentes têm propriedades metálicas. A utilização de aço pode ser atribuída às notáveis propriedades desta liga, à abundância das matérias-primas necessárias à sua produção e o preço competitivo. O aço é uma liga de natureza relativamente complexa e a sua definição não é simples, visto que, os aços comerciais não são ligas binárias (ligas compostas por 2 metais). Apesar dos seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, existem sempre outros elementos secundários. Nestas condições, define-se o aço como sendo uma liga Ferro-Carbono, contendo geralmente entre 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos secundários (como Silício, Manganês, Fósforo e Enxofre), presentes devido aos processos de fabrico (V. Chiaverini, 2002).

Quanto ao aspeto comercial, os aços podem ser produzidos e comercializados de diversas formas: barra, tubo, fundido, etc., como mostra a Figura 2.1².

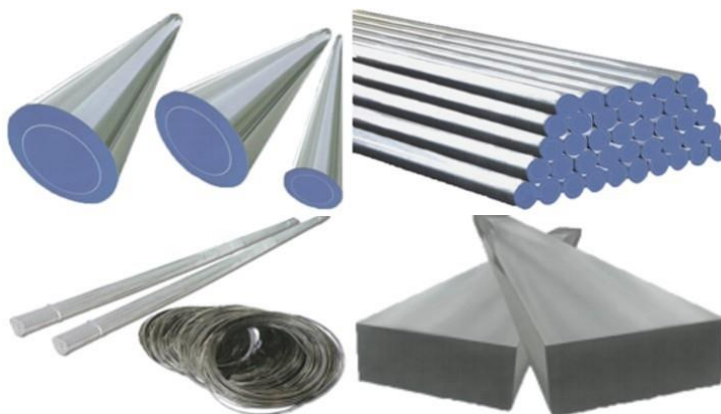


Figura 2.1 - Formas disponíveis de comercialização dos aços.

No presente trabalho serão utilizados os aços AISI H13 e D2, recozidos (eliminação de dureza) e tratados termicamente. O aço AISI H13 insere-se no grupo de aços para trabalho a quente ao invés do aço AISI D2 que se insere no grupo de aços para trabalho a frio.

Segundo Soares (2009), considera-se por trabalho a quente o regime de trabalho em que determinada ferramenta está sujeita a uma temperatura permanente no mínimo de 200 °C, podendo ainda suportar picos de temperatura inerentes ao processo. Por sua vez, Mesquita, 2001 define por trabalho a frio o processo em que determinada ferramenta está sujeita a uma temperatura inferior a 200 °C, tipicamente na temperatura ambiente. Nestas condições, as ferramentas são submetidas a elevados esforços mecânicos e ao desgaste.

Nas tabelas 2.1 e 2.2 são apresentadas outras designações, para além da norma AISI para os aços em estudo.

Tabela 2.1 - Designação do aço AISI H13 nas diversas normas.

AISI ³	EURONORM ⁴	DIN ⁵	NUMERO (Europa)
H13	X40CrMoV 5-1	X40CrMoV 5 1	1.2344

Tabela 2.2 - Designação do aço AISI D2 nas diversas normas.

AISI	EURONORM	DIN	NUMERO (Europa)
D2	X160CrMoV12-1	X155CrVMo12-1	1.2379

No decorrer do texto será utilizada a norma AISI para designar os aços apresentados.

² http://www.toptechtool.com/tool_steels.html

³ American Iron and Steel Institut, Nova Iorque

⁴ European Norm (EN)

⁵ Deutsches Institut fur Normung (norma alemã)

2.3.2 Propriedades mecânicas

De acordo com El-Sonbaty, Khashaba e Machaly (2004), sendo as propriedades e a aplicação o principal fator a ter em conta na escolha de um determinado material, torna-se fundamental conhecer propriedades, como a dureza e a resistência mecânica, uma vez que são estas que mais influenciam a maquinabilidade de um material.

Algumas das propriedades mecânicas que caracterizam os aços AISI H13 e D2 encontram-se nas Tabelas 2.3 e 2.4, respetivamente. De notar que, os valores apresentados para o aço AISI H13 são referentes a um tratamento térmico com têmpera entre 995-1025 °C e os valores apresentados para o aço AISI D2 são relativos a um tratamento térmico com têmpera de 200 °C.

Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas do aço AISI H13⁶ tratado termicamente.

Dureza [HRC]	55
Módulo de Elasticidade [GPa]	210
Tensão Limite de Elasticidade [MPa]	1650
Tensão de Ruptura [MPa]	1990
Coefficiente de Poisson	0,3

Tabela 2.4 - Propriedades mecânicas do aço AISI D2⁷ tratado termicamente.

Dureza [HRC]	60
Módulo de Elasticidade [GPa]	200
Tensão Limite de Elasticidade [MPa]	1532
Tensão de Ruptura [MPa]	2200
Coefficiente de Poisson	0,3

2.3.3 Tratamentos térmicos aplicados aos aços

Os tratamentos térmicos têm por objetivo modificar as propriedades dos aços e de outros materiais através de um conjunto de operações que incluem o aquecimento e o arrefecimento em condições controladas. Invariavelmente, o tratamento térmico final de um aço-ferramenta é constituído por três fases: aquecimento no domínio austenítico, arrefecimento para transformar a austenite em martensite (ou bainite) e revenido para eliminar a eventual austenite residual e formar carbonetos na martensite (ASM, 1978 e Roberts, 1998).

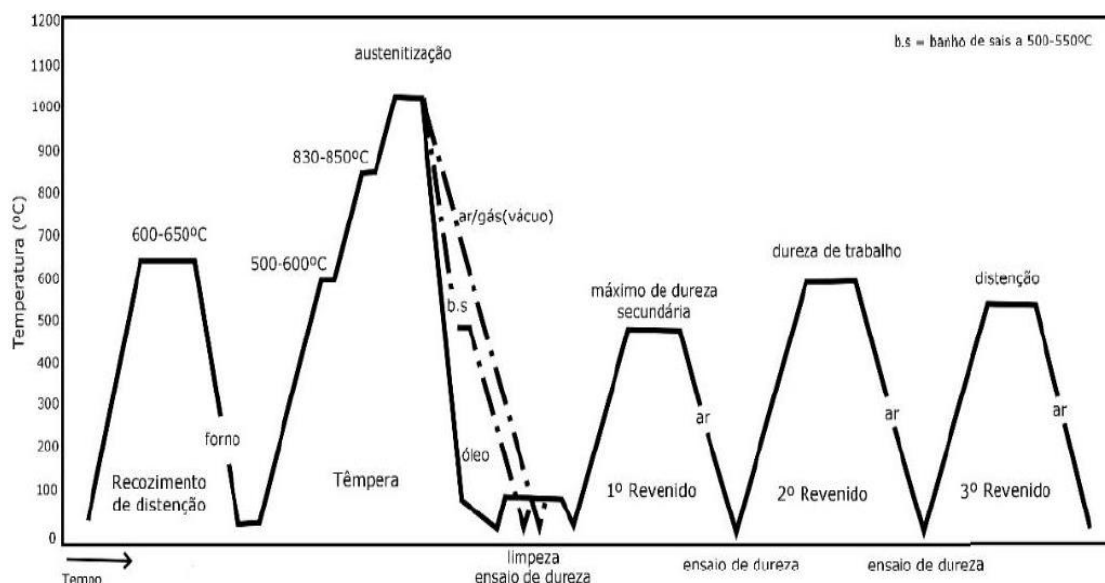
O ciclo de tratamento térmico varia conforme o tipo de aço e a sua aplicação. No caso dos aços para trabalho a quente, onde se insere efetivamente o aço AISI H13, o ciclo consiste em realizar um recozimento de distensão seguido de têmpera e três revenidos. Na Figura 2.2 encontra-se um esquema do tratamento aplicado a este tipo de aços, proposto por Soares (2009).

Os aços ferramenta para trabalho a quente ligados ao cromo (H10 - H19) têm uma boa resistência a temperaturas elevadas inclusive sob condições de impacto. Na temperatura de serviço devem preservar a resistência mecânica e apresentar resistência à fadiga térmica. Este conjunto de requisitos exigentes, típicos de moldes de fundição, forjamento ou outro tipo de conformação a quente, é conseguido através de uma composição química com um teor de carbono médio e uma concentração relativamente elevada de cromo e outros elementos de liga formadores de carbonetos. O teor médio de carbono promove uma boa tenacidade, limitando a quantidade dos carbonetos de elementos de liga. A boa resistência a altas temperaturas é conseguida através da realização de uma têmpera acima dos 1000°C o que permite a formação de precipitados de carbonetos de cromo,

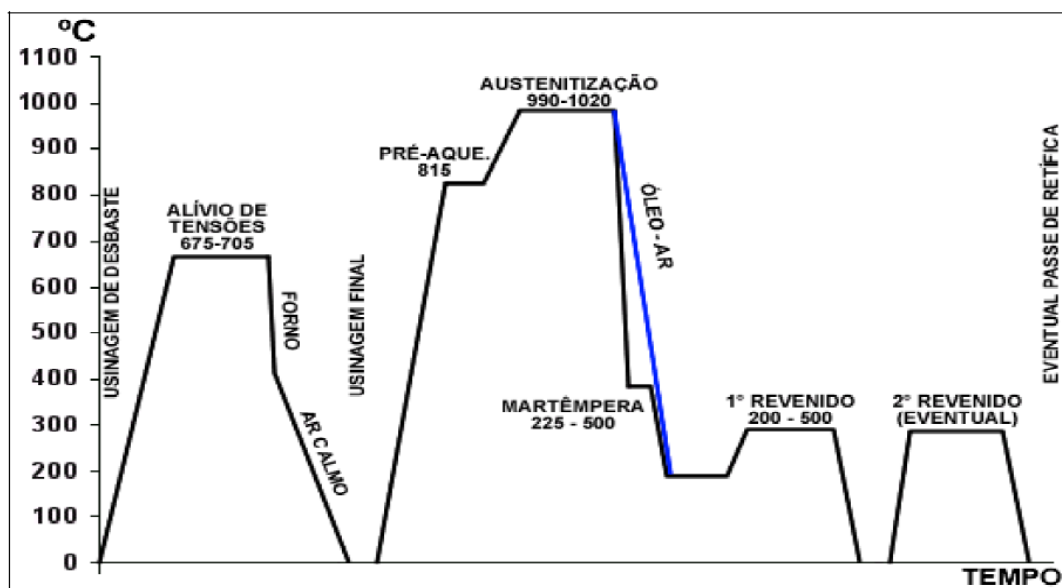
⁶http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e30d1d1038164808a85cf7ba6aa87ef7

⁷ http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=tool_steel_d2

vanádio e molibdênio, estáveis, finos e dispersos após revenido. Estes carbonetos juntam-se muito lentamente à temperatura de serviço. O alto teor de elementos de liga também permite uma excelente temperabilidade, permitindo o endurecimento de secções espessas arrefecidas ao ar (Totten, 2006).



No caso dos aços para trabalho a frio, onde se insere o aço AISI D2, o ciclo consiste na realização de um recozimento de distensão seguido de têmpera e dois revenidos. Na Figura 2.3 encontra-se um esquema do tratamento térmico aplicado a este tipo de aços.



Os tratamentos térmicos aplicados aos aços em estudo foram realizados pela empresa fornecedora.

⁸ <http://www.favorit.com.br/produtos/acos-ferramenta/aco-aisi-d2>

2.4 MAQUINAGEM DE AÇOS

A manufatura de metais requer um conhecimento aprofundado de todos os parâmetros que poderão influenciar a sua maquinagem, de forma a proporcionar uma qualidade máxima, bem como uma minimização de custos, prolongando a vida das ferramentas de corte e consequente o aumento da eficiência de produção. De entre diversos fatores importantes estão os parâmetros de corte, bem como a geometria e materiais das ferramentas.

2.4.1 Parâmetros e ferramentas de corte

Uma maquinagem eficaz requer o acesso a dados relativos aos parâmetros e ferramentas a utilizar numa dada liga, cujas propriedades devem ser conhecidas, visto que influenciam nomeadamente as forças de corte, potência de corte, a vida útil da ferramenta e a escolha do material da ferramenta (Donachie, 2000).

Na próxima secção são abordados aspetos relevantes da maquinagem de aços, onde se atribui ênfase aos parâmetros e ferramentas de corte, citando diversas investigações e testes realizados por diversos autores referenciados.

2.4.1.1 Parâmetros de corte

Quando as condições de maquinagem são selecionadas de forma adequada para cada material, podem ser alcançados níveis de custos de maquinagem aceitáveis.

Além das restrições nas aplicações das ferramentas cerâmicas, quando utilizadas, os valores de velocidade de corte (V_C) são geralmente inferiores comparados aos praticados nas ferramentas PCBN. No entanto, no torneamento de materiais endurecidos, os valores de velocidade de corte praticados com maior frequência estão no intervalo de (V_C) = 100 a 200 m/min.

Na Tabela 2.5 são apresentados alguns parâmetros de corte recomendados para o torneamento diversos aços.

Tabela 2.5 - Parâmetros de corte recomendados para o torneamento de aços (Sandvik, 2008).

Material	Força específica de corte ($K_C = 0,4$ [N/mm ²])	Dureza	Avanço f [mm/rot]
			0.1-0.25-0.4
			Velocidade de corte V_C [m/min]
Aços duros (endurecidos e temperados)	3250	45 HRC	205-155-100
	3950	50 HRC	170-125-85
	4700	55 HRC	140-105-70
Aço extra-duro (endurecidos e temperados)	5550	60 HRC	120-90-60
	6450	65 HRC	105-80-50

2.4.1.2 Ferramentas de corte

Tal como nos parâmetros de corte, as ferramentas têm bastante influência na maquinagem de qualquer tipo de material.

Uma ferramenta de corte deve aliar algumas características relevantes, tais como alta dureza em elevadas temperaturas, alta resistência mecânica e ao desgaste, alta tenacidade, alta resistência ao choque térmico, à compressão e elevada estabilidade química (Matsumoto e Diniz, 2000). Deste modo, é recomendável a utilização de ferramentas cerâmicas ou de CBN na maquinagem de metais (Godoy e Diniz, 2011).

De acordo com Machado e Silva (1999) e Yen *et al.* (2004) a geometria da ferramenta de corte exerce influência na maquinagem de metais, mais especificamente na forma da zona de deformação da peça, distribuição de tensão, temperatura e forças de corte.

Silva (2002) concluiu que arestas de corte chanfradas são mais resistentes ao lascamento quando comparadas às arestas arredondadas, mas como desvantagem causam um aumento das forças de avanço.

O material cerâmico possui algumas propriedades que são importantes para materiais de ferramentas, tais como a dureza a quente e a elevada estabilidade química. Porém, tem como propriedade desfavorável para a sua utilização em torneamento duro a baixa tenacidade. O material cerâmico com base de óxido de alumínio com ou sem nitreto e/ou carboneto de titânio adicionados à liga (cerâmica pura ou cerâmica mista) tem alta dureza, alta estabilidade química com o ferro, porém possui baixa tenacidade, sendo utilizado em torneamento de aço endurecido de superfícies lisas. Já as pastilhas cerâmicas de base de óxido de alumínio reforçadas com “*whiskers*” (monocristais de carboneto de silício) possuem alta dureza, alta tenacidade, mas baixa estabilidade química com o ferro, sendo utilizadas no torneamento de aço endurecido de superfícies interrompidas, em que a resistência ao choque (tenacidade) é importante e a estabilidade química já não é tão necessária porque, devido às interrupções do corte, a temperatura da ferramenta não atinge valores tão altos como no corte contínuo (Diniz, Marcondes e Coppini, 2013).

A adequada seleção do material da ferramenta deve levar em consideração uma série de fatores, como por exemplo, (Diniz, Marcondes e Coppini, 2013):

- Material a ser maquinado;
- Processo e condições de maquinagem;
- Condições da máquina operatriz;
- Forma e dimensões da ferramenta;
- Custo do material da ferramenta.

O grupo de ferramentas composto por pastilhas à base de materiais cerâmicos é formado por várias classes as quais estão divididas em dois grupos em função do material empregado como matriz – óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3) ou nitreto de silício (Si_3N_4). Dentro destes grupos, estes materiais diferem entre si de acordo com as suas características e propriedades.

Existem três formas básicas de preparação da aresta de corte: arredondamento, chanfro e chanfro com arredondamento. O tamanho do raio de arredondamento da aresta pode variar entre 25 μm (raio de aresta pequeno) até 180 μm (raio de aresta grande). Esta variação no raio de aresta está relacionada com a espessura média de corte. Recomenda-se que a espessura média seja pelo menos de duas a três vezes maior do que o raio de arredondamento da aresta (Stephenson, 2006).

Segundo Bartarya e Choudhury (2011), a faixa de velocidade de corte mais comum no torneamento de aço endurecido com ferramentas cerâmicas ou de CBN é entre 100 e 250 m/min. A espessura nominal da apara e a razão entre esta e o raio de ponta são pequenos, pois são usadas pequenas profundidades de maquinagem ($a_p=0,2$ mm), pequenos avanços (f de 0,05 a 0,2 mm/rot) e grandes raios de ponta da ferramenta ($r_e=0,8$ mm).

As pastilhas cerâmicas e de PCBN requerem alguns cuidados especiais quando utilizados, em virtude de possuírem baixa tenacidade quando comparados com o metal endurecido. O ângulo de ataque necessita possuir valores negativos, pelo fato de esta geometria colocar a ponta da ferramenta sob a ação de forças de compressão, eliminando assim a formação de fissuras devido à tração. Utiliza-se, quando possível, arestas de corte chanfradas (0,1 mm - 20° a 45°) a fim de direcionar as forças de corte para o centro da ferramenta, reduzindo-se a possibilidade de quebra das arestas (Ezugwu e Wallbank, 2001).

2.5 CONDIÇÕES DE CORTE TESTADAS

Nesta seção são apresentadas as condições de corte utilizadas por diversos autores na maquinagem de aços endurecidos, em torneamento.

Na Tabela 2.6 são indicados vários parâmetros utilizados por diversos autores na maquinagem de alguns aços endurecidos termicamente.

Tabela 2.6 - Parâmetros de corte recomendados para o torneamento de diversos aços.

Autores	Material	Dureza (HRC)	V_c [m/min]	f [mm/rot]	a_p [mm]	Ferramenta
Aslantas (2012)	AISI 52100	63	250	0,07	0,5	Pastilhas cerâmicas com revestimento TiAlN
Bajic <i>et al.</i> (2012)	AISI 4140	60	120	0,1	1,0	Pastilhas cerâmicas
			140	0,2	1,5	
			102	0,25		
Gaitonde <i>et al.</i> (2009)	AISI D2	61	80	0,05	0,2	Pastilhas cerâmicas
			115	0,10		
			150	0,15		
Grzesik (2008)	AISI 5140	60	100	0,10	0,2	Pastilhas cerâmicas mistas de classe CC650
Paulo Campos (2015)	AISI H3	54	100	0,10	0,15	Pastilhas cerâmicas
			150	0,15	0,225	
			225	0,225	0,33	
			267,61	0,27	0,39	
Kaider, Mohamed e Tarek (2009)	AISI 52100	64	125	0,08	0,15	Pastilhas CBN
			176	0,12	0,30	
			246	0,16	0,45	
Figueira e Davim (2007)	AISI D2	60	80	0,05	0,2	Pastilhas cerâmicas (Al_2O_3/TiC)
			240			
Renato e Davim (2014)	AISI H13	54	80	0,05	0,05	Pastilhas cerâmicas ($Al_2O_3/TiN/TiC$)
			150	0,10	0,10	
			220	0,15	0,40	

Da análise da Tabela 2.6, constatou-se que o intervalo de profundidade de corte praticado com maior frequência no torneamento de materiais endurecidos está entre (a_p) = 0,15 – 0,20 mm e o avanço (f) entre 0,05 e 0,20 mm/rot.

O parâmetro de maquinagem de grande importância no torneamento é o avanço uma vez que possui maior impacto no acabamento do componente maquinado. Desta forma, o avanço é estipulado em função do raio de ponta da ferramenta (r_e) e do padrão de rugosidade desejado no componente maquinado.

2.6 MAQUINABILIDADE

O conceito de maquinabilidade descreve a facilidade, alta ou baixa, que um material tem para ser trabalhado por maquinagem. Considerando os critérios gerais, a maquinabilidade é avaliada segundo: a vida da ferramenta de corte, acabamento superficial, temperatura de corte, forças de corte e forma da apara (Khanna e Davim, 2015).

2.6.1 Desgaste e vida da ferramenta de corte

A vida de uma ferramenta de corte é medida pelo tempo no qual esta efetivamente trabalha entre duas afiações sucessivas ou a troca da aresta de corte da pastilha. Machado *et al.* (2009) dizem que por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas e por menor que seja a resistência mecânica da peça, a ferramenta sofrerá sempre desgaste e acabará por ter de ser substituída. Isto ocorre porque durante a maquinagem, a ferramenta é exposta a uma combinação de fatores de origem abrasiva, mecânica, química e térmica. Uma vez que os materiais da peça e da ferramenta não são homogêneos, os desgastes podem ser observados na ferramenta durante o seu uso.

O desgaste é definido pela norma ISO 3685 (1993) como a mudança da forma original da ferramenta durante o corte, resultante da perda gradual de material. A progressão do desgaste apresenta-se como uma falha contínua e progressiva em proporções pequenas, podendo ocorrer por vários mecanismos entre os quais a deformação plástica. Por ser um processo contínuo, o comportamento do desgaste pode ser modelado matematicamente ao longo do seu progresso até ao dano completo da ferramenta (Machado *et al.*, 2009).

Geralmente, o desgaste nas ferramentas de corte dá-se na face de ataque e na face de saída e é medido tendo em conta o desgaste em cada uma dessas faces, como mostra a Figura 2.4. O desgaste na face de saída (VB ou VB_{máx}) é aquele em que a análise recai, para avaliar o momento em que a ferramenta deverá ser substituída.

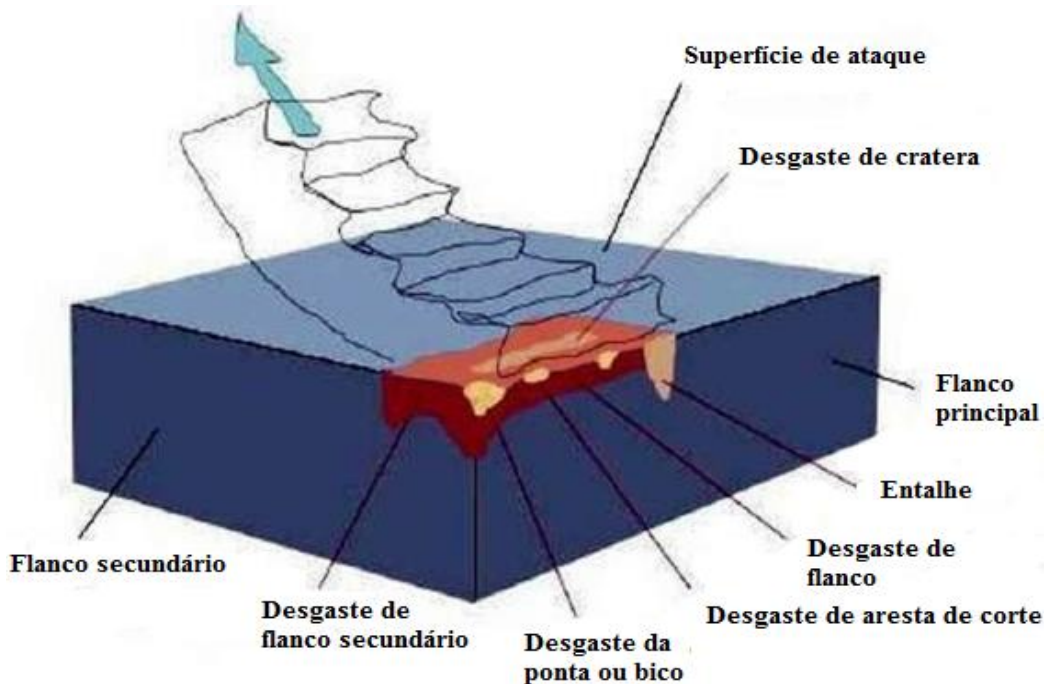


Figura 2.4 - Desgaste da ferramenta de corte na maquinagem (Sandvik, 2010).

O cálculo do tempo de vida da ferramenta de corte é efetuado recorrendo ao modelo de Taylor, Equação 1:

$$T \times V_c^x = K \quad (1)$$

onde T é a vida útil da ferramenta [min], V_c é a velocidade de corte [m/min], x e K são constantes da equação. A determinação das constantes da equação é realizada recorrendo ao tempo de vida, obtido experimentalmente, para duas velocidades de corte diferentes, mantendo no entanto o avanço e a profundidade de corte em ambos os ensaios.

Diniz *et al.* (2010) citam que para operações de acabamento, o fim de vida de uma ferramenta de corte pode ser definido quando não é mais possível conseguir tolerâncias apertadas ou não é atingido o acabamento requerido na superfície maquinada da peça, devido principalmente ao desgaste na face de saída (V_B) da superfície de folga da ferramenta.

Gaitonde *et al.* (2009) também efetuaram um estudo de desgaste e vida de ferramentas cerâmicas. Estes autores utilizaram pastilhas cerâmicas de alumina mista (Al_2O_3 -TiC) na realização de um ensaio de torneamento do aço AISI D2 com dureza média de 50/61 HRC. Neste trabalho foi verificado que o desgaste na face de saída da ferramenta aumenta linearmente com o aumento da profundidade de corte.

Nas ferramentas de metal duro com cobertura, segundo Diniz *et al.* (2010), V_B cresce lentamente em virtude da alta resistência ao desgaste das camadas de cobertura da ferramenta até atingir valores na ordem de 0,3 a 0,4 mm, enquanto que o desgaste da cratera é muito pequeno ou inexistente. Após o desgaste das camadas de cobertura, o corte passa a ser realizado pelo substrato da ferramenta, que possui menor resistência ao desgaste fazendo V_B crescer mais rapidamente, atingindo-se valores da ordem de 0,8 a 1,0 mm num tempo muito curto.

2.6.2 Rugosidade/ precisão dimensional

As alterações superficiais (ou acabamento) de um componente maquinado são resultantes da combinação de diversos fatores, que podem ser divididos em rugosidade, ondulações e falhas (Machado *et al.*, 2009).

A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros microgeométricos resultantes da ação da ferramenta de corte na peça, que são inerentes ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, etc.).

Existem diversos fatores que podem contribuir para a formação dessas irregularidades nomeadamente: marcas da aresta da ferramenta ou de fragmentos da mesma, as quais podem apresentar natureza periódica para alguns processos e aleatória para outros, geração de rebarba do material durante a operação, restos de aresta postiça de corte de uma ferramenta na superfície maquinada e a forma geométrica do quebra-aparas na aresta da ferramenta (Machado *et al.* 2009).

O estudo da maquinabilidade de um material por vezes é realizado segundo a sua integridade superficial, sendo efetuadas análises da sua superfície depois de maquinada. Isto deve-se essencialmente ao facto de a qualidade da superfície ser vital aquando do seu emprego em aplicações de maior responsabilidade. De entre todos os parâmetros analisados, destacam-se a rugosidade da superfície, textura, dureza, tensões residuais e microestrutura (Pervaiz *et al.*, 2014).

A técnica mais comum de avaliação da rugosidade é utilizar um rugosímetro com apalpador de ponta de diamante (rugosimetria “clássica”) e serve de suporte à aplicação dos critérios de rugosidade. No entanto, existem técnicas mais recentes que recorrem a modelos tridimensionais utilizando lentes e técnicas especiais de recolha de imagem da superfície, tais como *scanners* 3D através de luz estruturada.

Em geral, a literatura mostra que o aumento da velocidade de corte reduz os defeitos obtidos nas superfícies maquinadas. Muitos autores têm mostrado que quando se usam condições de corte mais severas, como grandes avanços e profundidades, e em especial o uso de ferramentas desgastadas, surgem maiores danos na superfície (Hughes, 2006).

Entre os parâmetros mais utilizados no controlo do estado de superfície das peças podem destacar-se:

- Rugosidade média aritmética (R_a)

É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo (medido) em relação à linha média num comprimento de amostragem.

Onde:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2)$$

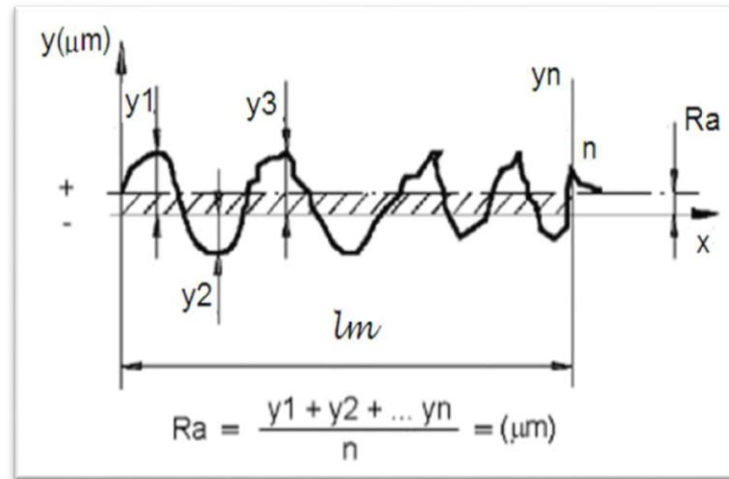


Figura 2.5 - Rugosidade média aritmética R_a (Agostinho *et al.*, 1995).

- Rugosidade média geométrica (R_q)

Define-se como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo (medido) em relação à linha média num comprimento de amostragem. O seu valor é cerca de 11 % maior que o valor medido em R_a , pois a elevação ao quadrado amplifica o efeito das irregularidades.

É calculado pela seguinte fórmula:

$$R_q = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right)} \quad (3)$$

- Profundidade média de rugosidade (R_z)

É definida pela diferença entre o valor médio dos cinco maiores picos e as cinco maiores reentrâncias de irregularidades medidas a partir de uma linha paralela à linha média num comprimento de amostragem, conforme ilustrado na Figura 2.6.

Onde:

$$R_z = \frac{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5)}{5} - \frac{(r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5)}{5} \quad (4)$$

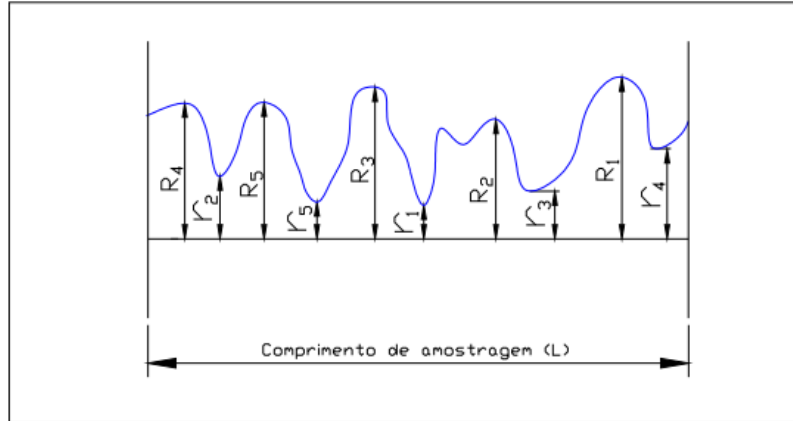


Figura 2.6 - Altura das irregularidades dos 10 pontos R_z (Agostinho *et al.*, 1990).

- Amplitude máxima da rugosidade (R_t)

Define-se como a distância entre o maior pico e a maior reentrância de irregularidade medida no comprimento de amostragem. Para tal medição são utilizados aparelhos traçadores de perfil. A Figura 2.7 mostra como é realizada a medição de R_t .

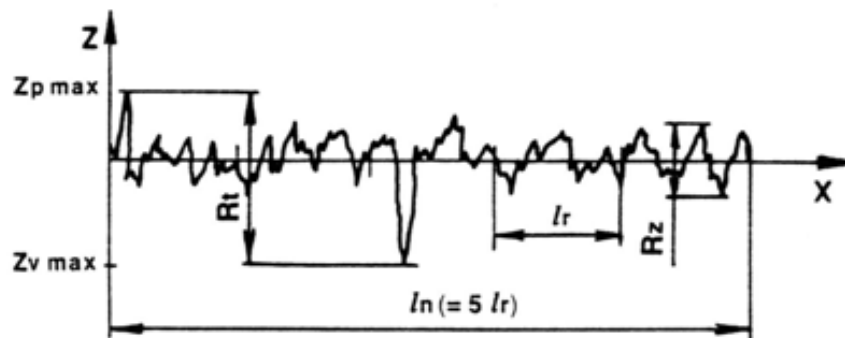


Figura 2.7 - Amplitude máxima da rugosidade “ R_t ” (Agostinho *et al.*, 1990).

- Profundidade média de aplainamento (R_p)

É a ordenada do maior pico de irregularidade com a linha média, no comprimento de amostragem.

A influência dos parâmetros de maquinagem no acabamento superficial é notória através das expressões teóricas 5 e 6, que expressam a amplitude máxima da rugosidade teórica (R_{tt}) em $[\mu\text{m}]$, e a rugosidade média aritmética teórica (R_{ta}), em $[\mu\text{m}]$, respetivamente.

$$R_{tt} = \frac{f^2}{8r_e} \times 1000 \quad (5)$$

$$R_{ta} = \frac{f^2}{32r_e} \times 1000 \quad (6)$$

em que f é o avanço [mm/rot] e r_e o raio de ponta da ferramenta, em [mm].

- Relação R_a/R_t

Correia e Davim (2011) introduziram um parâmetro não dimensional K (razão entre os valores teóricos de rugosidade média aritmética e amplitude máxima de rugosidade), obtido a partir das Equações (5) e (6):

$$K = \frac{R_{ta}}{R_{tt}} = \frac{\frac{f^2}{32r_e}}{\frac{f^2}{8r_e}} = \frac{8}{32} = 0,25 \quad (7)$$

Assim, é possível estimar qualitativamente a proporção dos parâmetros das rugosidades experimentais geradas. Se as razões de rugosidade obtidas se encontrarem próximas do 0,25 significa que existe pouca discrepância entre R_a e R_t , sendo os valores de picos e vales baixos.

Dado que a precisão dimensional está interligada diretamente com o acabamento superficial, esta pode ser relacionada com a rugosidade média aritmética através da seguinte expressão empírica:

$$IT \approx 30 \times R_a \quad (8)$$

sendo que a informação obtida pela Equação 8 é bastante importante na fase de projeto de um produto.

Tal como noutros metais, na maquinagem de aços endurecidos existe a preocupação de obter o melhor acabamento superficial proporcionado para o fim pretendido, havendo por isso desenvolvimentos na investigação com o objetivo de otimizar as condições de corte e assim obter um bom acabamento superficial.

A qualidade superficial é um dos principais parâmetros de avaliação em peças técnicas de engenharia onde a rugosidade superficial revela uma especial importância (Kivak, 2014). A rugosidade superficial tem ainda importância mais significativa na avaliação de superfícies de peças maquinadas em materiais endurecidos. Esta importância está relacionada com a constante comparação entre processos de *hard machining* e processos de retificação (Davim, 2008a).

Geier *et al.* (2011) apresentaram inicialmente a relação entre as rugosidades média aritmética (R_a) e máxima (R_t) e a taxa de remoção de material (Q) para determinadas ferramentas, utilizando corpos de prova dos aços AISI 1020, AISI 1045 e AISI 4140 trefilados a frio. Em seguida, Geier e Souza (2011) investigaram o desempenho dessas ferramentas de dois fabricantes no torneamento de acabamento do aço AISI 4140 para dois raios de ponta ($r_e = 0,4$ e $0,8$ mm) e quatro avanços ($f = 0,075$, $0,15$, $0,225$ e $0,3$ mm/rot) em relação aos parâmetros de rugosidade R_a , R_t e R_a/R_t . Verificaram que, para $r_e = 0,4$ mm e $f = 0,3$ mm/rot foi possível obter superfícies maquinadas com valores de R_a inferiores a $0,9 \mu\text{m}$ para a ferramenta de geometria *wiper* e próximos de $2,5 \mu\text{m}$ para a *standard*.

O aumento do raio de ponta da ferramenta torna-a mais resistente, porém acarreta um aumento da vibração devido ao maior atrito causado pela maior área de contato entre a peça e a ferramenta. O acabamento da superfície depende muito da relação entre avanço (f) e raio de ponta (r_e) (Diniz *et al.*, 2010; Machado *et al.*, 2009; Kalpakjian e Schmid, 2010).

Segundo o estudo comparativo realizado por Grzesik e Wanat (2006) sobre o acabamento gerado em processos de torneamento de materiais endurecidos, as superfícies maquinadas apresentam valores similares de rugosidade para ambas as geometrias de ferramenta quando utilizado avanço $f = 0,10$ mm/rot para *standard* e $f = 0,20$ mm/rot para *wiper*.

Na Tabela 2.7 podem ser observados os valores de rugosidade média aritmética utilizados nas diferentes aplicações.

Tabela 2.7 - Valores de rugosidades nas diversas aplicações.

Aplicações típicas de rugosidades	Ra [μm]
Blocos-padrão, guias de instrumentos de medição de alta precisão	$\approx 0,01$
Superfícies de medidas de micrômetros	$\approx 0,02$
Calibradores, elementos de válvulas de alta pressão hidráulica	$\approx 0,03$
Agulhas de rolamento, superacabamento de camisa de bloco de motor	$\approx 0,04$
Pistas de rolamentos	$\approx 0,05$
Camisa de bloco de motores	$\approx 0,06$
Eixos montados em mancais de teflon, bronze com velocidade média	$\approx 0,1$
Tambores de freios, válvulas de esfera	$\approx 0,6$
Superfícies maquinadas em geral, alojamento de rolamentos	≈ 2 a 3
Superfícies fundidas, estampadas	≈ 5 a 15
Peças fundidas, forjadas e laminadas	≥ 15

2.6.3 Forças de maquinagem

A medição das forças de corte no processo de maquinagem é um aspeto essencial na análise da maquinabilidade de materiais. As forças de corte têm uma influência direta em pontos como a concepção de ferramentas de corte e no seu desgaste, a análise térmica, a caracterização de apra, a previsão de rugosidade da superfície obtida, entre outros. As forças de corte são também importantes quando multiplicadas pela velocidade de corte, na medida em que determinam a potência requerida no processo de maquinagem, definindo desde logo a potência mínima que a máquina-ferramenta deverá apresentar.

No torneamento, a força de maquinagem projeta-se sobre a direção de corte (F_c , ou F_z), de avanço (F_f , ou F_y) e de penetramento (F_{ap} , ou F_x) (Figura 2.8).

Gaitonde *et al.* (2009) no torneamento do aço AISI D2 com ferramentas cerâmicas observaram que no caso das pastilhas de geometria *wiper* a força de maquinagem (F_m) aumenta com a profundidade de corte. No entanto, para pastilhas de geometria convencional ocorre uma diminuição desta para profundidades de corte superiores a 0,45 mm.

Özel *et al.* (2007), utilizando o mesmo aço que os autores anteriormente citados e utilizando também as mesmas pastilhas, verificaram que a força de maquinagem aumenta com a velocidade de corte.

Segundo Ozel *et al.* (2000), Davies *et al.* (2002) e Ikua *et al.* (2002) a variação verificada em cada uma das componentes das forças de maquinagem é justificada pela fraca rigidez do equipamento, do sistema de fixação da peça e da fragmentação da apra, verificados durante o processo de maquinagem.

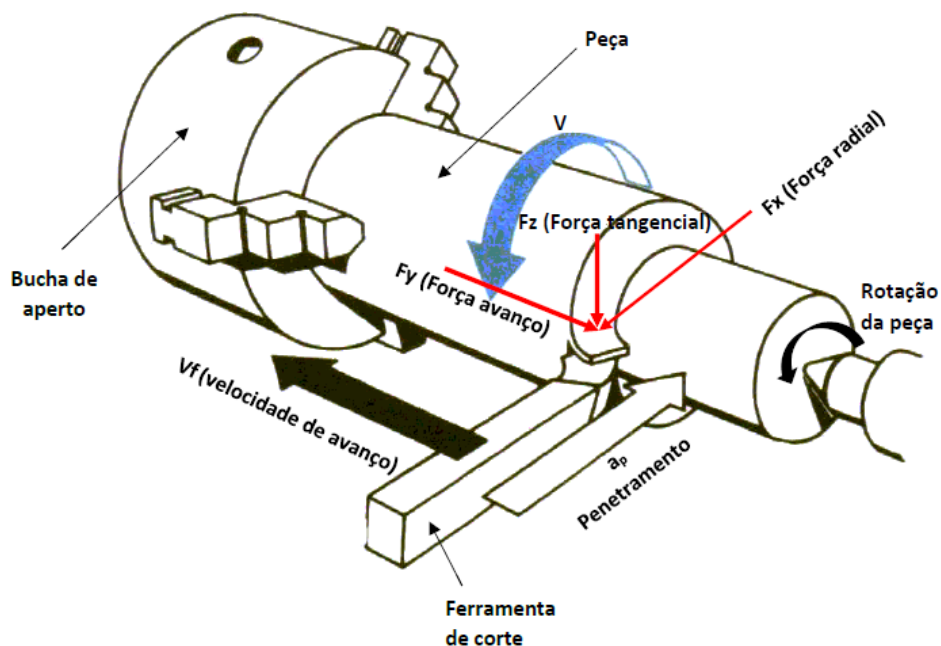


Figura 2.8 - Componentes da força de maquinagem em operações de torneamento (Ozel *et al.*, 2000).

2.6.4 Temperatura de corte

O principal efeito da temperatura é verificado no desgaste das ferramentas de corte. Tendo em conta outros mecanismos de desgaste, é admitido que um aumento da temperatura de corte promove o desgaste gradual da ferramenta (Wanigarathne *et al.*, 2005). Komanduri e Hou (2001) afirmam que a máxima temperatura de corte e o seu gradiente tem implicações nas subcamadas do material, em alterações estruturais da superfície maquinada e nas tensões residuais na peça finalizada.

Devido ao aumento da temperatura de corte e da frequência do processo, causadas pelas maiores velocidades de corte, os mecanismos de desgaste das ferramentas podem mudar com o decorrer dos elevados carregamentos térmicos e mecânicos nos materiais de corte. Parâmetros de maquinagem para cada situação não são encontrados com facilidade na literatura utilizando-se, em muitas situações, a utilização de parâmetros baseados na prática da maquinagem convencional. Portanto, um acréscimo na vida da ferramenta pode ser alcançado pela determinação dos fenômenos de desgaste e pela escolha apropriada dos materiais da ferramenta, parâmetros tecnológicos e estratégias de maquinagem (Davies, Burns e Schmitz, 1999).

Hu e Huang (2014) avaliaram a influência da geometria das ferramentas na temperatura de corte utilizando simulação pelo método dos elementos finitos. Considerando a utilização de pastilhas cerâmicas mistas (Al_2O_3) e uma velocidade de corte de 100 m/min no torneamento do aço AISI H13 e SDK11, estes autores verificaram que ângulos de saída maiores reduzem significativamente a temperatura da zona de corte. A justificação apresentada é que com ângulos de saída maiores há uma menor deformação da apana, sendo menor o calor gerado. Neste trabalho, os mesmos autores também concluíram que a temperatura aumenta com o aumento do ângulo de aresta, assim como com o desgaste da ferramenta.

Jianxin *et al.* (2005) utilizaram pastilhas cerâmicas de Al_2O_3/TiB_2 no torneamento de aço endurecido (45-50HRC) e verificaram que a temperatura de corte aumenta com a velocidade de corte atingindo valores acima dos 800 °C para velocidades de corte de 120 m/min e acima de 1190 °C para velocidades de 210 m/min.

Shalaby *et al.* (2014) utilizando cerâmicas mistas ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) no torneamento do aço AISI D2 (52 HRC) verificaram que a condutividade térmica da ferramenta interfere na temperatura registada na zona de contacto entre a apara e a peça. Acrescentam ainda que as elevadas temperaturas envolvidas no processo de corte a seco deste material são responsáveis pela formação de uma camada protetora na zona de atrito da ferramenta devido à presença de certos elementos. Esta camada impede que o calor atinja o núcleo da ferramenta.

El Hakim *et al.* (2014) consideraram que a temperatura de corte é definida como a temperatura medida na interface da ferramenta de corte (na face inclinada da ferramenta). A velocidade de corte tem um efeito significativo sobre a temperatura de corte. No seu estudo, enquanto a temperatura de corte aumenta dramaticamente com o aumento da velocidade de corte, as componentes de força de corte tendem a diminuir ligeiramente com o aumento da velocidade de corte durante o torneamento duro.

2.6.5 Vibrações

O conjunto máquina-ferramenta, a peça a maquinar e os sistemas de fixação formam um complexo grupo constituído de associações de elementos estruturais. Durante a maquinagem, uma substancial quantidade de energia é dissipada por meio de deformações e pelo atrito. Parte desta energia é transmitida aos elementos estruturais do sistema e induzem vibrações. Estas vibrações devem ser minimizadas devido à sua influência negativa:

- Na peça, em função da degradação da qualidade da superfície e dimensional;
- Na ferramenta, devido à aceleração do desgaste e ao surgimento de lascamentos;
- Na máquina-ferramenta, com a aceleração do desgaste e/ou com a redução da vida do eixo-árvore.

Especialmente na maquinagem de altas velocidades, os obstáculos estabelecidos pelas vibrações tornam-se limitantes para uma melhor utilização das máquinas-ferramenta e das ferramentas de maquinagem (Rashid e Nicolescu, 2006; Toh, 2004a).

As vibrações no processo de maquinagem podem ser de três tipos (Huo e Cheng, 2009):

- Vibrações livres: ocorrem quando uma fonte externa de energia é aplicada para que as vibrações iniciem-se e em seguida esta fonte é removida. Nas máquinas-ferramenta, a origem das vibrações livres pode ser através de vibrações transmitidas pelas fundações, imperfeições nos materiais, forças inerciais entre os componentes em contato.
- Vibrações forçadas: ocorrem quando existe a presença de uma fonte externa, as vibrações são chamadas vibrações forçadas. O comportamento do sistema sob a ação deste tipo de vibração depende da excitação aplicada. O seu impacto é maior quando a frequência está próxima das frequências naturais da operação de maquinagem, podendo levar à instabilidade muito indesejável do sistema.
- Vibrações auto-excitadas ou “chatter”: é um tipo de vibração na qual a fonte está dentro do próprio sistema. Ocorrem devido às variações nas condições de corte, durante a maquinagem sob parâmetros específicos (constante) do processo.

Segundo Altintas (2002), Benhabib (2003) e Scheffer *et al.* (2005), as vibrações das ferramentas de corte e da peça durante a maquinagem podem ser bastante prejudiciais causando desgaste e avaria da ferramenta e afetando negativamente a precisão dimensional e o acabamento superficial das peças.

Contudo, pode-se concluir que não importa quanto rígida é a estrutura da máquina-ferramenta, as vibrações presentes durante a maquinagem são inevitáveis.

2.6.6 Taxa de produção

A taxa de produção (T_p) é definida como o volume de material removido por unidade de tempo e a sua análise tem grande importância nomeadamente numa análise económica. Essa taxa pode ser calculada pela Equação (9), em que S_{apara} é a secção da apara e V_c a velocidade de corte (Davim *et al.*, 2006).

$$T_p = S_{apara} \times V_c = f \times a_p \times V_c \quad (9)$$

Segundo Tonshoff (1996) a taxa de produção em *hard turning* é muito maior que no processo de retificação mesmo quando realizada com profundidades de corte e avanços baixos.

Existe uma clara diferença entre condições de maquinagem severa e leve, no entanto, em alguns casos as diferenças são obscuras, pois é possível escolher condições que combinam altas taxas de remoção de material com boa integridade superficial. Rech e Moisan (2003) estudaram a influência das condições de maquinagem em engrenagens de aço cementado e observaram que existem condições de corte que não devem ser empregadas para produção em larga escala.

2.6.7 Tecnologia *wiper*

As pastilhas *wiper* são pastilhas de alta produtividade usadas em operações de semi-acabamento e acabamento em maquinagem. Podem ser aplicadas em torneamento com altas taxas de avanço, sem perder a capacidade de gerar bom acabamento superficial, nem a capacidade de quebrar aparas. Estas ferramentas possuem uma alteração na geometria, mais especificamente no raio de ponta, de modo a que tanto os valores de avanço (f) como de profundidade de corte (a_p) possam ser o dobro dos valores usados nas ferramentas convencionais sem desvalorizar o acabamento superficial da peça (Sandvik, 2012).

Ainda de acordo com Sandvik (2012), o raio de ponta de uma pastilha alisadora *wiper* tem na sua construção 3 a 9 raios de ponta diferentes. Isso aumenta o comprimento de contato das pastilhas e o efeito das faixas de avanço ou a superfície de um modo positivo.

O processo de corte das pastilhas *wiper* é similar ao processo de corte das pastilhas convencionais (Figura 2.9). A diferença entre elas reside no facto das pastilhas *wiper* não possuírem apenas um raio de ponta único, mas aquilo que se designa por raio de ponta múltiplo. Este raio múltiplo faz com que na zona posterior da ferramenta haja uma zona que entra em contacto com a peça após o corte inicial. Este contacto proporciona uma diminuição dos picos de rugosidade, obtendo-se desta forma um melhor acabamento superficial (Knight and Boothroyd, 2005).

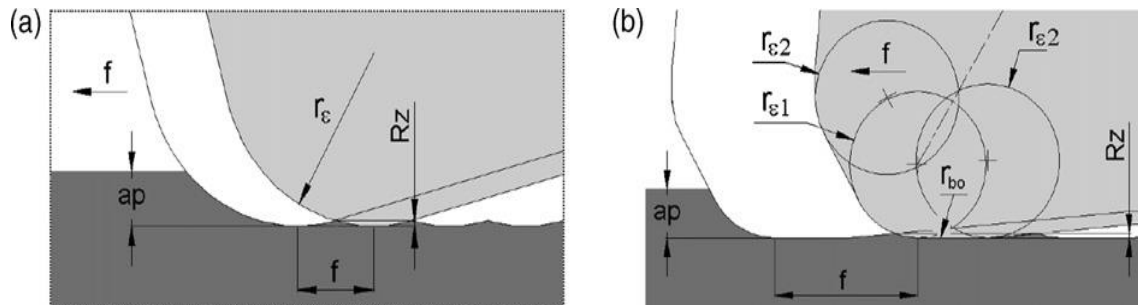


Figura 2.9 - Geometrias das ferramentas de corte: (a) Geometria convencional, (b) Geometria *wiper* (W. Grzesik, 2008).

2.7 SÍNTESE

Ao longo deste capítulo foram enumeradas várias características quer dos aços em estudo quer das pastilhas e também dos processos de maquinagem.

O estudo da maquinabilidade de aços, principalmente tratados termicamente é de extrema importância do ponto de vista industrial. A necessidade de utilizar aços de elevada dureza, como o caso dos aços AISI H13 e D2 utilizados no presente trabalho, torna necessária a realização de ensaios que permitam estabelecer um conjunto de condições de corte ótimas, quer do ponto de vista tecnológico quer do ponto de vista económico.

Operações de *hard machining*, mais concretamente de *hard turning*, possibilitam a dispensa de operações posteriores de retificação. No entanto, são necessárias ferramentas de corte avançadas que se adequem às características específicas do material a maquinar. Apresentam-se como solução as ferramentas cerâmicas e de CBN, que caracterizam-se por possuírem elevada dureza a quente e elevada resistência ao desgaste. As ferramentas do tipo cerâmico, alvo de estudo no presente trabalho, assinalam-se por possuírem baixa tenacidade, sendo esse um dos principais problemas encontrados na sua utilização. Contudo, alguns desenvolvimentos na sua produção como a inclusão de óxido de zircónio ou nitreto de titânio revelaram melhorias no desempenho destas ferramentas.

A geometria das ferramentas de corte também é um fator de influência na análise da maquinabilidade dos materiais. A geometria *wiper*, também conhecida como geometria multi-raio, demonstra ser uma tecnologia vantajosa, na medida em que permite obter melhores acabamentos de superfície e permite a utilização de avanços duas vezes superiores relativamente aos utilizados pelas pastilhas convencionais.

A conjugação dos aspetos acima citados tem sido alvo de estudo por diversos autores cujos trabalhos foram apresentados ao longo do presente capítulo. Não só incidindo sobre os aços tratados AISI H13 e D2, mas também sobre outros aços tratados, os autores basearam os seus trabalhos em alguns parâmetros de avaliação: tipo e forma de apara, desgaste da ferramenta de corte, acabamento de superfície, precisão dimensional, temperatura de corte e força de maquinagem. Perante isto, da análise da Tabela A.I.1, e recorrendo a toda a informação presente no capítulo 2, é possível verificar que a maioria dos testes foram realizados para velocidades de corte compreendidas ente 80 m/min e 220 m/min e avanços compreendidos entre 0,05 e 0,25. É pretendido obter dados sobre acabamento superficial e precisão dimensional dos diferentes tipos de aço e comparar também os valores obtidos nas duas geometrias de pastilhas.

Capítulo 3

Metodologia experimental

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentadas as condições selecionadas nos ensaios de maquinagem, o material utilizado e a sua forma/dimensão, o planeamento dos ensaios, a especificação das ferramentas utilizadas, os parâmetros de maquinagem, bem como os critérios de análise a que se recorreu para a avaliação. Desta forma, pretende-se facilitar a compreensão da metodologia utilizada e assim possibilitar a reprodução deste processo, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos.

Todos os procedimentos experimentais foram realizados no laboratório de tecnologia mecânica e no Laboratório de Maquinagem e Tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Aveiro (UA).

3.1 MATERIAIS ENSAIADOS

Os materiais utilizados nos ensaios experimentais foram o aço AISI H13, recozido e tratado termicamente para trabalho a quente e o aço AISI D2, também recozido e tratado termicamente para trabalho a frio, fornecidos pela empresa F. Ramada sob a forma de varões.

Foram fornecidos o aço AISI H13 após recozimento (255 HB) e o aço AISI H13 que foi posteriormente sujeito a um processo de têmpera sob vácuo a 1060 °C seguido de dois revenidos (200 °C + 200 °C). A dureza final obtida foi de 54 HRC, valor máximo de dureza para este aço. As propriedades químicas do aço utilizado no presente trabalho encontram-se na Tabela 3.1, e foram fornecidas também pela empresa.

Tabela 3.1 - Composição química do aço AISI H13 (% em peso).

Carbono (C)	Crómio (Cr)	Molibdénio (Mo)	Silício (Si)	Manganês (Mn)	Vanádio (V)	Fósforo (P)	Enxofre (S)
0,37-0,43	4,80-5,50	1,2-1,5	0,90-1,20	0,3-0,5	0,9-1,10	0,030	0,030

Também foram fornecidos o aço AISI D2 após recozimento (260 HB) e o aço AISI D2 sujeito a um processo de têmpera sob vácuo entre 1000 e 1040 °C com uma dureza final de 60 HRC, próximo do valor máximo para este aço. As propriedades químicas do aço AISI D2 também foram facultadas pela empresa fornecedora e encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Composição química do aço AISI D2 (% em peso).

Carbono (C)	Crómio (Cr)	Molibdénio (Mo)	Silício (Si)	Manganês (Mn)	Vanádio (V)	Fósforo (P)	Enxofre (S)
1,45-1,65	11,00-13,00	0,60-0,90	0,10-0,40	0,15-0,50	0,70-1,00	0,030	0,030

O material foi disponibilizado sob a forma de varões. Os provetes de cada aço possuíam diâmetros compreendidos entre 43,45 e 50,95 mm, aproximadamente. Na Figura 3.1 encontram-se representados os provetes utilizados na realização do presente trabalho.

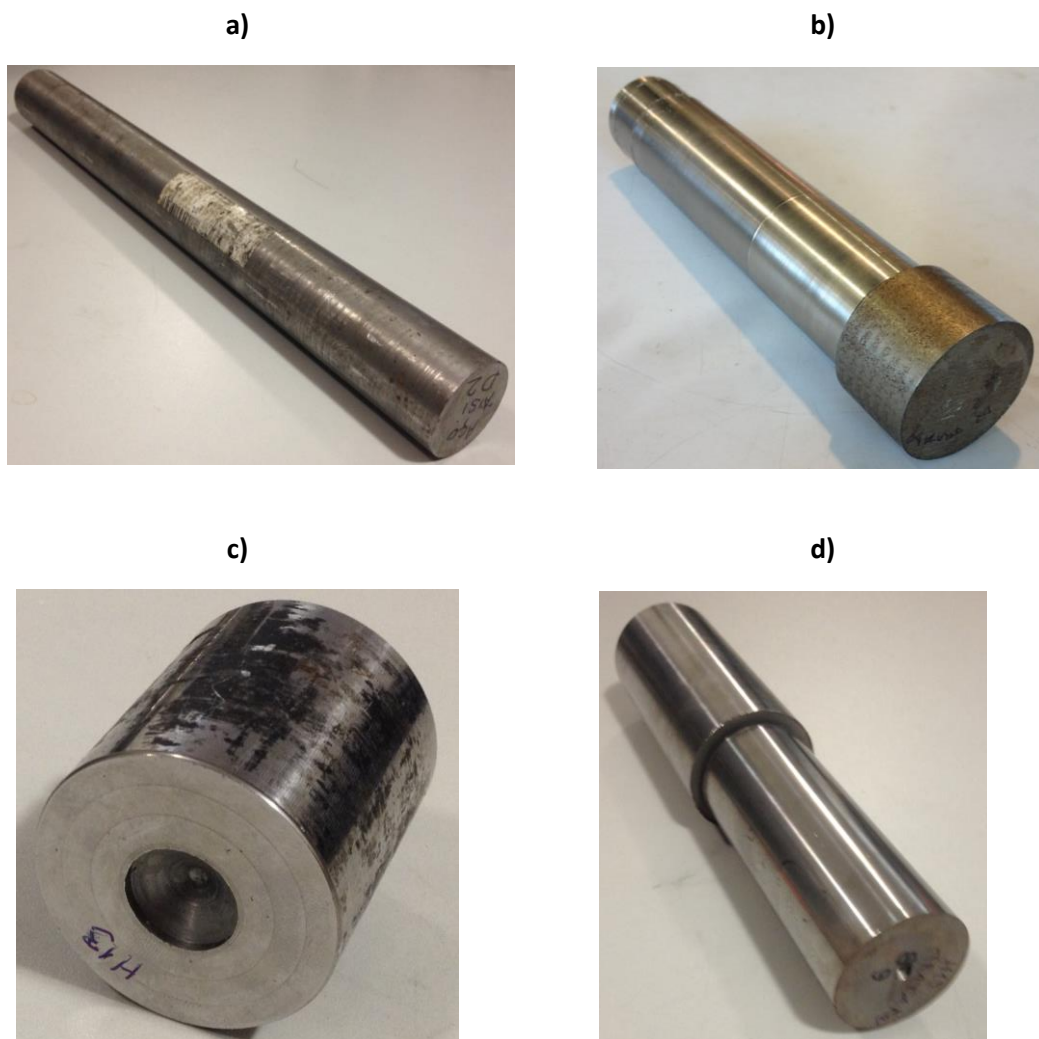


Figura 3.1 - Provetes utilizados nos ensaios: a) Aço AISI D2 (260 HB), b) Aço AISI D2 (54HRC), c) Aço AISI H13 (255 HB), d) Aço AISI H13 (60 HRC).

Como se pode verificar na Figura 3.1, os provetes possuem diferentes tamanhos pois para os materiais tratados termicamente não havia possibilidade de os serrar devido á elevada dureza. Relativamente ao diâmetro dos provetes, da mesma forma que o tamanho, não houve possibilidade de igualar os provetes pois, não existiam ferramentas suficientes para fazer o desbaste devido ao desgaste causado pelos provetes de elevada dureza.

3.2 FERRAMENTAS DE CORTE

As pastilhas de corte utilizadas no presente trabalho foram as cerâmicas CNGA 120408 T01020 e CNGA 120408 T01020 WG (ver Anexo IV) com geometria convencional e *wiper*, respetivamente. Ambas foram fornecidas pela Sandvik Coromant⁹. Para a sua fixação foi utilizado o porta-ferramentas DCLNL 2020K 12, com fixação da pastilha por grampo, Figura 3.2b).

⁹ <http://www.sandvik.coromant.com>



a)



b)



c)

Figura 3.2 - Ferramentas de corte utilizadas nos ensaios: a) porta-ferramenta pastilha DCLNL 2020K 12, b) fixação da pastilha por grampo, c) pastilhas CNGA 120408 T01020 e CNGA 120408 T01020 WG, cortesia Sandvik.

Na Tabela 3.3 apresenta-se a geometria das ferramentas utilizadas tal como a norma ISO, utilizada pela empresa que a fornece.

Tabela 3.3 - Identificação e geometria das ferramentas utilizadas nos ensaios.

Resistência ao desgaste	ISO	Ângulo de ataque γ°	Ângulo de posição χ°	Raio de curvatura da ponta r_e [mm]	Ângulo de saída α°	Ângulo de inclinação λ°
CC650	CNGA 120408 T01020	10	95	0,8	0	20
CC650 WG	CNGA 120408 T01020 WG	10	95	0,8	0	20

A pastilha CC650 pertence á classe de cerâmica mista (CM) baseada em alumina (Al_2O_3) com uma adição de carboneto de titânio (TiC), sem quebra-aparas. Recomenda-se principalmente para as operações de acabamento em ferro fundido, aço endurecido e superligas resistentes em que a combinação da resistência ao desgaste com boas propriedades térmicas é necessária.

3.3 MÁQUINA-FERRAMENTA

Na elaboração dos ensaios práticos utilizou-se o Torno CNC Kingsbury MHP 50 com 18 kW de potência e rotação máxima de 4500 rpm, Figura 3.3. Este possui um comando numérico FANUC, bucha de aperto hidráulico para peças até 200 mm de diâmetro e uma torreta com capacidade de armazenamento até 12 ferramentas, possibilitando ainda o uso de contraponto. Outras características intrínsecas ao torno CNC usado estão descritas na Tabela A.II.1.



Figura 3.3 - Torno CNC Kingsbury MHP 50 utilizado nos ensaios.

3.4 PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS

Os parâmetros de corte utilizados foram definidos baseando-se no catálogo do fabricante das pastilhas, delineando assim os valores de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte mais convenientes para os materiais em questão. Teve-se em conta também a obtenção de uma qualidade superficial boa.

De seguida são descritos todos os parâmetros de corte utilizados nos ensaios dos aços AISI H3 e D2, Tabelas 3.4 e 3.5, sendo ilustrados e explicados posteriormente.

Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados no primeiro teste.

Velocidade de corte (V_c) [m/min]	Avanço (f) [mm/rot]	Profundidade de corte (a_p) [mm]
100	0,05	0,20
	0,10	
	0,20	

Tabela 3.5 - Parâmetros utilizados no segundo teste.

Avanço (f) [mm/rot]	Velocidade de corte (V_c) [m/min]	Profundidade de corte (a_p) [mm]
0,1	50	0,20
	100	
	200	

3.4.1 Estratégias de corte

O levantamento de dados propriamente dito é uma atividade muito importante na execução do presente trabalho. Um banco de dados mal elaborado pode conduzir a resultados insatisfatórios ou deficientes. Dessa forma, é extremamente importante o planejamento detalhado do procedimento experimental, bem como a adequada execução e registro.

Nesta secção é abordada a estratégia de corte adotada nos ensaios, sendo que optou-se pela realização de dois tipos de testes. O primeiro teste consistiu em fixar a velocidade de corte $V_c=100$ m/min, fixar também o penetramento $a_p=0,2$ mm e variar o avanço (f). Este procedimento foi realizado em cada provete e também para as duas pastilhas (convencional e *wiper*). O segundo teste consistiu em fixar o avanço $f=0,10$ mm/rot, fixar o penetramento $a_p=0,2$ mm e variar as velocidades de corte (V_c).

Os provetes foram divididos em três regiões (Figura 3.4). Cada uma das secções (L1 a L3) possui um comprimento de 10 mm. A ferramenta de corte efetua o movimento de corte sobre cada uma delas e retorna à posição de origem.

O procedimento repetiu-se para cada material e para cada pastilha (convencional e *wiper*).

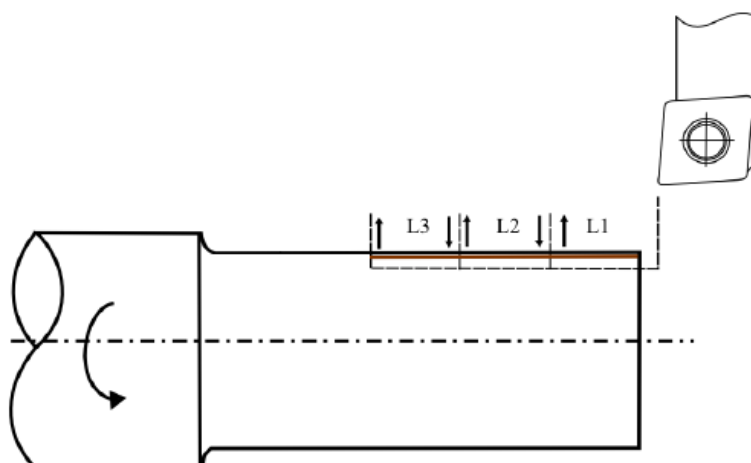


Figura 3.4 - Representação esquemática dos ensaios de avaliação de rugosidade.

3.5 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA MAQUINABILIDADE UTILIZADOS

Neste tópico é descrito cada método utilizado para a avaliação da maquinabilidade dos materiais em estudo, assim como os parâmetros de avaliação usado nesse método.

3.5.1 Medição da rugosidade superficial

Tal como descrito no capítulo 2, a rugosimetria é uma das técnicas mais regularmente utilizadas na caracterização de uma superfície, sendo também um parâmetro de caracterização da maquinabilidade de um dado material. Por forma a caracterizar a rugosidade superficial, foi utilizado o rugosímetro de agulha de diamante Hommel Tester T1000E, Figura 3.5. Este dispositivo apresenta uma resolução máxima de $0,01\text{ }\mu\text{m}$, cut-off configurável entre 0,25 e 0,8, campo de medição de cerca de $80\text{ }\mu\text{m}$ e está incluído na categoria 1 de precisão segundo a norma DIN 4772.



Figura 3.5 - Representação do rugosímetro em medição.

A medição da rugosidade da peça maquinada foi efetuada, para todos os testes, depois da superfície ter sido limpa com ar comprimido à temperatura ambiente. Foi realizada a medição em três pontos distintos do provete deslocados de 120° , Figura 3.6, para cada parâmetro de corte utilizado. Levando em linha de conta a baixa rugosidade necessária e por forma a melhorar a compreensão de rugosidade da superfície, foi usado um cut-off (L_c) de 0,8 mm para todos os testes, e um comprimento total de palpagem (L_t) igual a 4,8 mm.

As superfícies torneadas foram caracterizadas utilizando parâmetros de amplitude, tendo sido escolhidas como parâmetros as rugosidades (R_a , R_t , R_z , R_q , R_p).

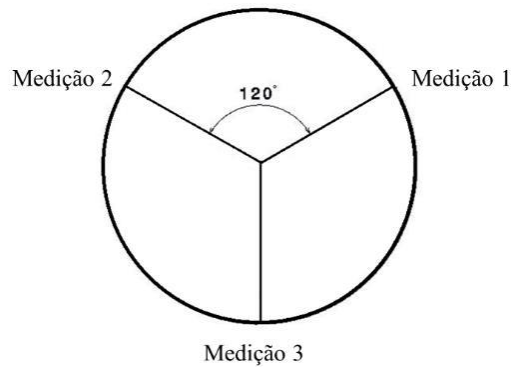


Figura 3.6 - Esquema de medição da rugosidade ao longo dos provetes de ensaio.

Durante a experimentação os provetes eram retirados da máquina para executar as medições da rugosidade.

3.6 SÍNTESE

É apresentado no organograma da Figura 3.7, de uma forma sucinta e esquemática, todo o procedimento experimental realizado na maquinagem dos aços em estudo, que vai desde a aquisição dos provetes à análise dos resultados.

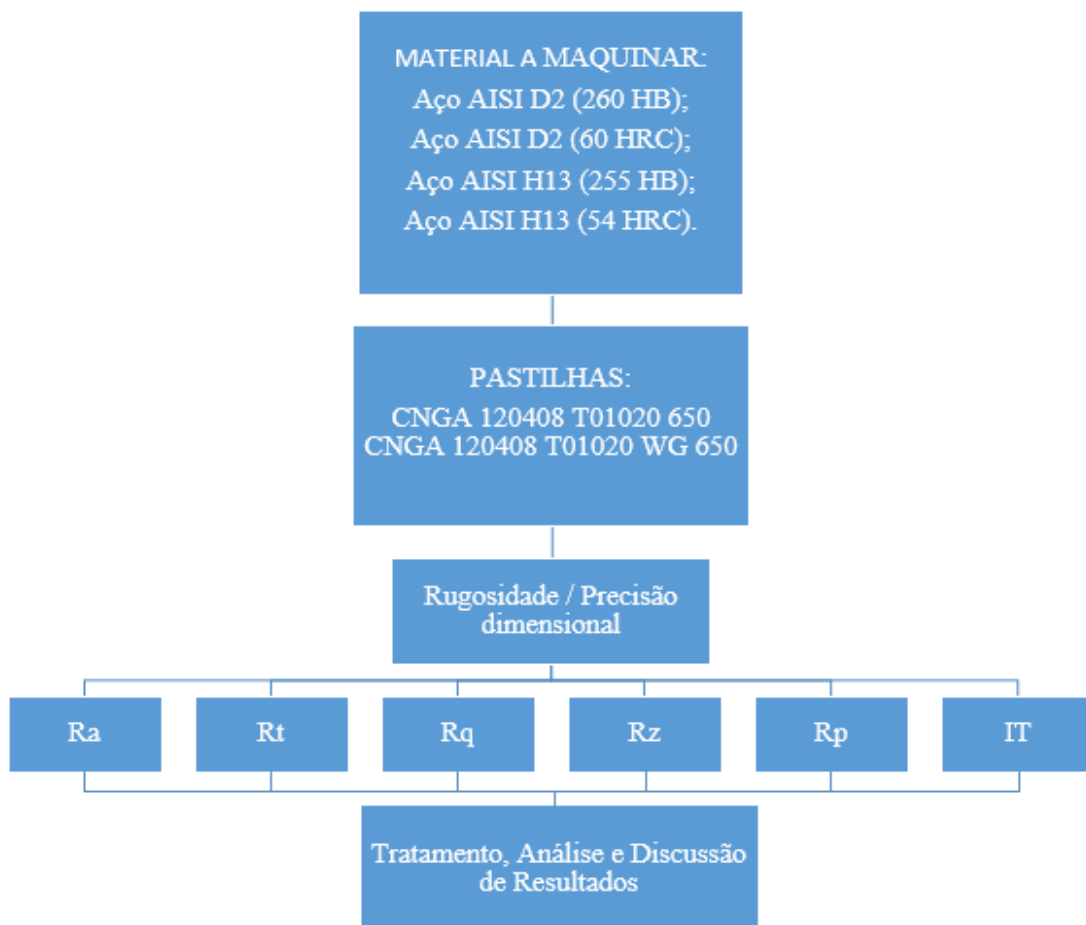


Figura 3.7 - Organograma do procedimento experimental executado na presente dissertação.

Capítulo 4

Análise e discussão de resultados

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais de torneamento exterior a seco realizados ao longo da presente dissertação, de forma a atingirem os objetivos pretendidos inicialmente, e apresentados no primeiro capítulo.

Para avaliar os resultados obtidos é feita uma análise dos valores de acabamento superficial, da precisão dimensional e da taxa de produção, com recurso a gráficos. Para complementar os gráficos apresentados encontram-se em anexo as Tabelas A.III.7, A.III.8, A.III.9 e A.III.10 onde estão registados os parâmetros retirados no procedimento experimental. De salientar que todos os valores apresentados foram obtidos para um conjunto de parâmetros de corte analisado.

Nos valores apresentados teve-se em conta o erro associado em cada apalpador, sendo estes calculados nas Tabelas A.III.5 e A.III.6 ou seja, os valores de rugosidade e de IT encontra-se já contabilizado o erro dos apalpadores.

4.1 INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO E DA TECNOLOGIA *WIPER* NO ACABAMENTO SUPERFICIAL/ PRECISÃO DIMENSIONAL

4.1.1 Variação do avanço (f)

O acabamento superficial das peças é variável dependendo do processo de fabrico utilizado. Em alguns casos as peças podem ser sujeitas a um tratamento térmico para que o material fique endurecido. Na realidade o verdadeiro objetivo do tratamento térmico é fazer uma alteração microestrutural, obtendo-se uma estrutura de alta resistência mecânica, usualmente traduzida por um aumento de dureza.

Como os aços AISI H13 e D2 são empregues essencialmente na produção de moldes de trabalho a quente e a frio respetivamente, há uma necessidade de verificar-se o acabamento superficial pois, elevadas irregularidades serão transmitidas para as peças obtidas por fundição ou injeção. Apesar destes aços serem utilizados maioritariamente com tratamento térmico aplicado, convém analisá-los sem tratamento para haver valores de referência antes do tratamento térmico.

Nesta secção é analisada a influência do tratamento térmico aplicado nos aços em estudo, mais propriamente comparar os resultados obtidos de rugosidade e precisão dimensional relativamente á dureza apresentada por cada aço. Desta forma, esse estudo focou-se essencialmente no registo dos parâmetros de Ra, Rt bem como IT.

Tal como mostram as Equações teóricas 5 e 6, o avanço é o parâmetro de corte com maior influência na rugosidade superficial. Assim, realizou-se um estudo de velocidade de corte (V_c) fixa variando-se o avanço (f).

De forma simplificada e para melhor compreensão dos dados apresentados nas figuras que se seguem, encontram-se na Tabela 4.1 os aços e o seu respetivo tratamento.

Tabela 4.1- Aços e o seu tratamento térmico.

Aço	Tratamento
AISI D2 (260 HB)	Recozido
AISI D2 (250 HRC)	Tratado termicamente (têmpera e revenido)
AISI H13 (250 HB)	Recozido
AISI H13 (54 HRC)	Tratado termicamente (têmpera e revenido)

Na Figura 4.1 são representados os valores de Ra obtidos em função do avanço para os aços em estudo e, apresentados os valores para a utilização das pastilhas de geometria a) convencional e b) *wiper*. Para além dos valores obtidos na prática, são também representados os valores teóricos (Rta) calculados pela Equação 6 (Tabela A.III.4).

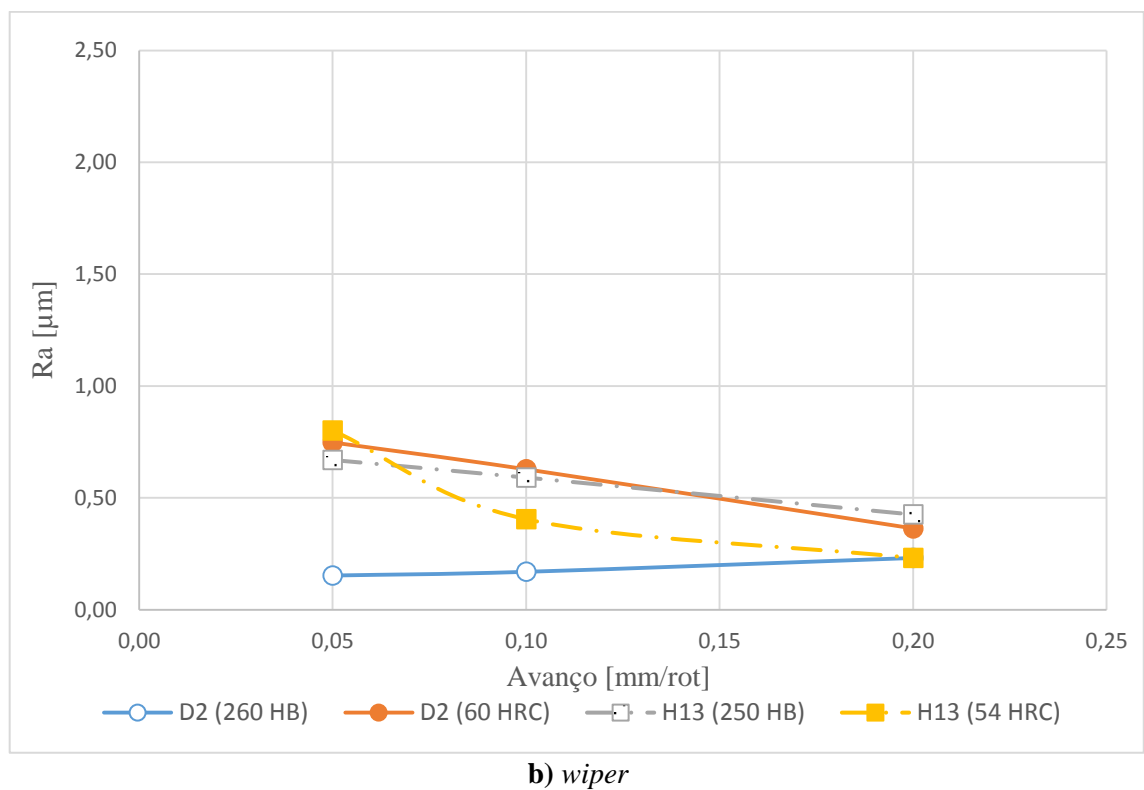
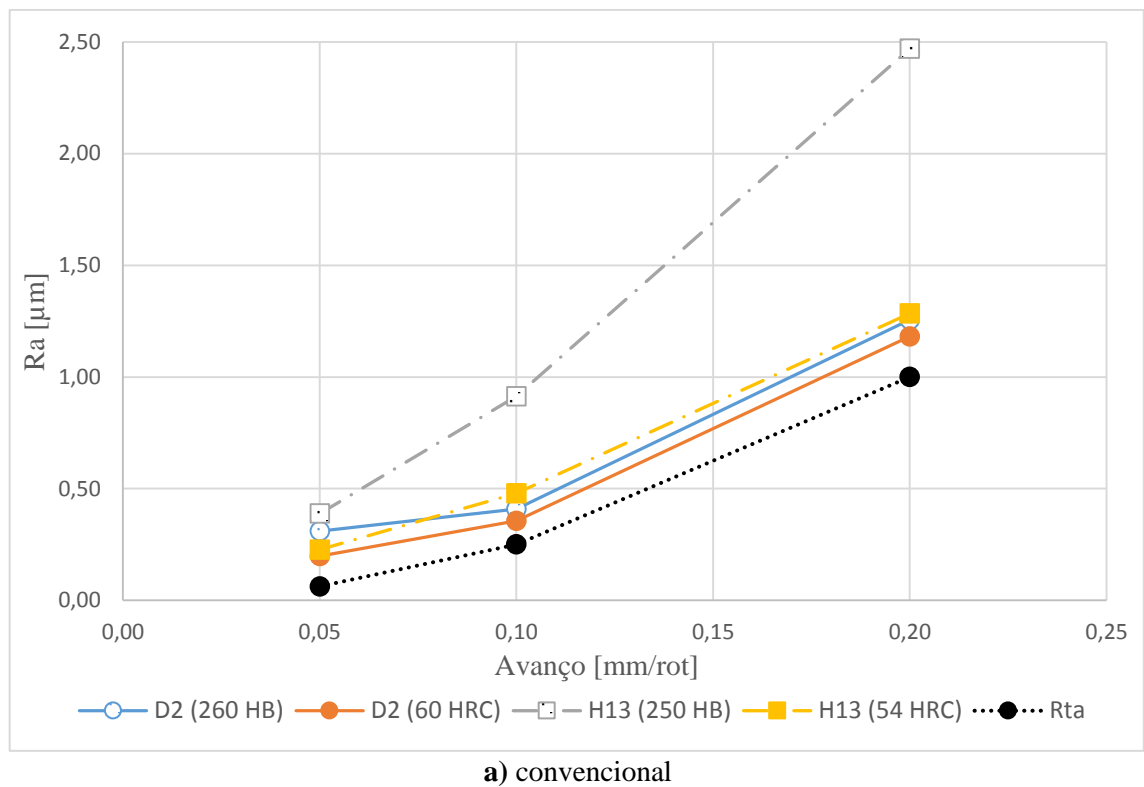


Figura 4.1- Evolução da rugosidade média aritmética (Ra) em função do avanço para a velocidade de corte (V_c) de 100 m/min nos diferentes aços.

É notório pela análise da Figura 4.1a) que o aumento do avanço tem como consequência um aumento da rugosidade média aritmética (R_a), como seria expectável e como provaram Ferreira *et al.* (2016). Observa-se que na pastilha com geometria convencional, para o avanço (f) de 0,05 mm/rot, os valores de rugosidade diminuem quanto maior a dureza do aço a maquinar. Nos restantes avanços verifica-se o mesmo exceto para o aço AISI D2 (260 HB) que obteve uma subida menos acentuada relativamente as restantes aços. Verifica-se também que o aço AISI H13 (250 HB) apresenta valores de R_a bastante superiores relativamente aos restantes aços porque ocorreu adesão das aparas ao provete maquinado.

Observa-se que a rugosidade teórica não condiz com os resultados experimentais e de acordo com Grzesik (2006) esta discrepância é justificada principalmente pela deformação plástica na região de corte, recuperação elástica da superfície após a maquinagem, adesão entre as aparas e a ferramenta e as vibrações entre ferramenta-provete.

Já na Figura 4.1b) confirma-se a premissa anunciada pelo fabricante que afirma: “Dobro do avanço – mesmo acabamento superficial. Mesmo avanço – acabamento superficial duas vezes superior” onde obtêm-se valores de rugosidade cada vez mais baixos à medida que aumenta o avanço. Verifica-se que o aço AISI D2 (260 HB) apresenta menores valores de R_a para todos os avanços testados. O avanço mais elevado (0,20 mm/rot) apresentou melhores resultados compreendidos entre 0,23 e 0,46 μm para todos os aços. Observou-se que neste avanço houve menor discrepância entre os valores obtidos nos diversos aços.

A ausência de valor teórico na Figura 4.1b) deve-se ao facto da geometria das pastilhas *wiper* ser raio-múltiplo.

O carbono aumenta a dureza e a temperabilidade dos aços, mas em quantidades elevadas forma microestruturas mais duras dificultando operações de deformação a frio ou induz empenamentos e fraturas em operações de tratamento térmico.

O aumento da dureza do material promove uma redução nas componentes da força de maquinagem. Esse fenómeno pode ser explicado pelo efeito da temperatura na interface aparaferramenta. O aumento da dureza no material maquinado promove o aumento da temperatura na região do corte, reduzindo a resistência ao corte do material. Outro fenómeno observado nessa condição é o aumento do ângulo de corte e a diminuição da espessura da apara, proporcionando a redução da área de contato na interface aparaferramenta (Qian e Hossan, 2007).

Como o valor de R_a num comprimento de amostragem indica a média da rugosidade e, como consequência se existir um pico ou vale na superfície esses valores não serão apresentados, procedeu-se à medição de R_t que, como se designou no capítulo 2, consiste na soma do maior pico com a maior reentrância de irregularidade medida no comprimento de amostragem.

A Figura 4.2 mostra a evolução de R_t em função dos diferentes avanços utilizados na maquinação dos aços em estudo, utilizando as pastilhas cerâmicas de geometria: a) convencional e b) *wiper*. Para além dos valores experimentais, são representados os valores teóricos (R_{tt}) obtidos pela Equação 5.

Pela observação da Figura 4.2a) verifica-se que, como acontece para o parâmetro R_a , o valor de R_t aumenta com o avanço. Observam-se maiores valores de R_t para os aços não tratados termicamente ou seja, quanto maior a dureza do aço a maquinar mais baixos são os valores de R_t . Verifica-se que todos os aços apresentam maiores valores de rugosidades relativamente aos valores teóricos (R_{tt}).

Na Figura 4.2 b) pode afirmar-se que quando torneados com pastilhas de geometria *wiper*, os aços AISI D2 apresentam menores valores de picos e vales de rugosidade relativamente aos aços AISI H13 para o avanço de 0,05 mm/rot. No avanço 0,20 mm/rot obtêm-se claramente menores valores de R_t e verifica-se que, o comportamento dos aços é idêntico na resposta a irregularidades exceto para o aço AISI H13 (250 HB). Da mesma forma que na Figura 4.1b), na Figura 4.2b) não se pode levar em conta a equação teórica uma vez que as pastilhas *wiper* são raio múltiplo.

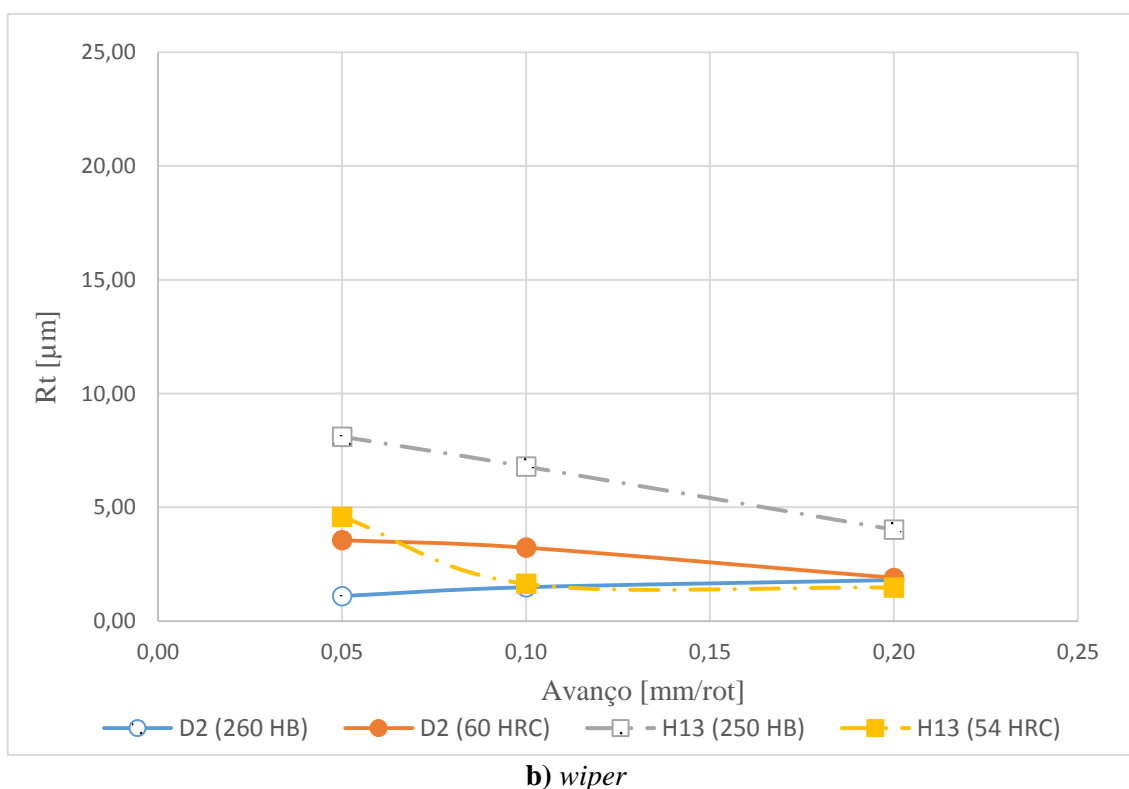
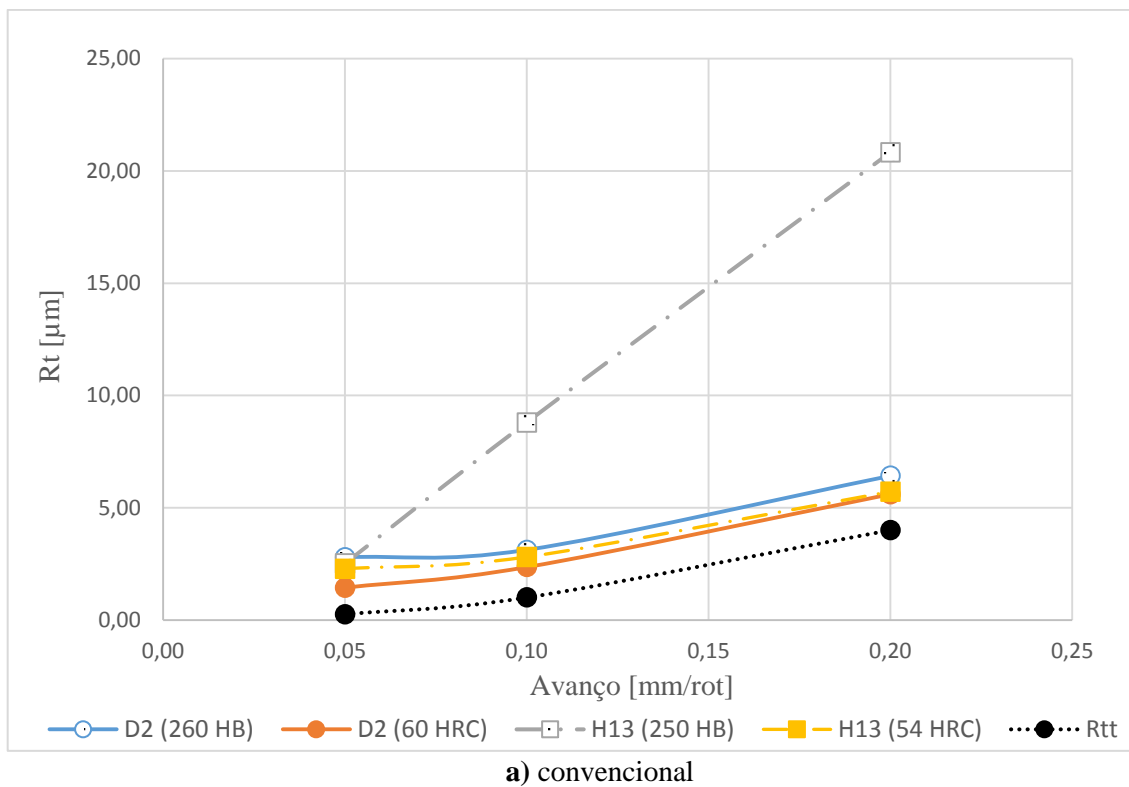


Figura 4.2 - Evolução da amplitude máxima rugosidade (R_t) em função do avanço para a velocidade de corte (V_c) de 100 m/min nos diferentes aços.

Da análise da Figura 4.2 demonstra-se que os valores obtidos são mais elevados relativamente aos valores pela Figura 4.1 pois são fornecidos valores sobre a máxima deterioração da superfície dos provetes.

Para melhor compreensão da discrepância entre a rugosidade média aritmética e a amplitude máxima de rugosidade realizou-se a razão entre ambas em função do avanço como mostra a Figura 4.3. Convém salientar-se que valores próximos de 0,25 assinalam valores ótimos entre R_a e R_t e valores próximos de 0 assinalam grande discrepância. O valor 0,25 corresponde ao valor teórico calculado pela razão entre R_{ta} e R_{tt} (Equação 7).

Como ilustra a Figura 4.3a), para o avanço de 0,05 mm/rot o aço AISI H13 apresenta menor desfasamento entre a rugosidade média e a amplitude máxima com uma dureza de 250 HB e por sua vez quando apresentado com tratamento térmico (54 HRC) apresenta maior discrepância na relação de rugosidades. Para os restantes avanços verifica-se que os aços de maior dureza apresentam menor discordância entre rugosidades, sendo os valores obtidos para o avanço de 0,20 mm/rot próximos do valor teórico.

Na Figura 4.3b) mostra-se que o comportamento dos aços na resposta à razão entre R_a e R_t associa-se diretamente à dureza onde, contrariamente aos gráficos R_a e R_t em que não se verifica nenhuma linearidade, observa-se que os aços de maior dureza apresentam valores mais próximos do valor teórico o que significa que existem menores irregularidades para os aços tratados termicamente. Para o aço AISI H13 (54 HRC) verifica-se que no avanço 0,10 mm/rot a razão R_a/R_t encontra-se muito próxima do valor teórico.

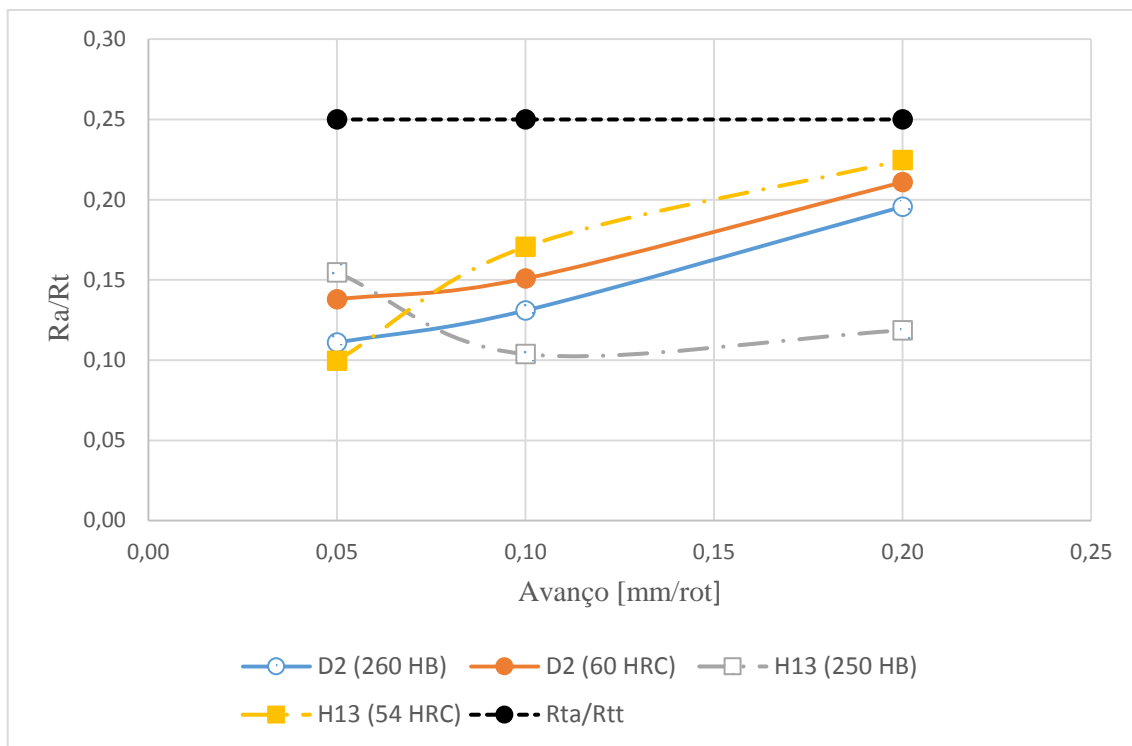
A representação do acabamento das superfícies não fornece qualquer informação sobre a qualidade (grau de tolerância) das dimensões das peças. No entanto, é evidente que uma qualidade dimensional elevada não se pode conciliar com superfícies grosseiramente trabalhadas.

Na Figura 4.4 encontra-se representada a evolução de IT em função do avanço nos aços em estudo, para as ferramentas cerâmicas de geometria: a) convencional e b) *wiper*. Como os provetes maquinados possuíam diferentes diâmetros houve a necessidade de utilizar duas gamas de IT, uma para diâmetros compreendidos entre 30 e 50 mm e outra para diâmetros compreendidos entre 50 e 80 mm (Tabelas A.III.1 e A.III.2).

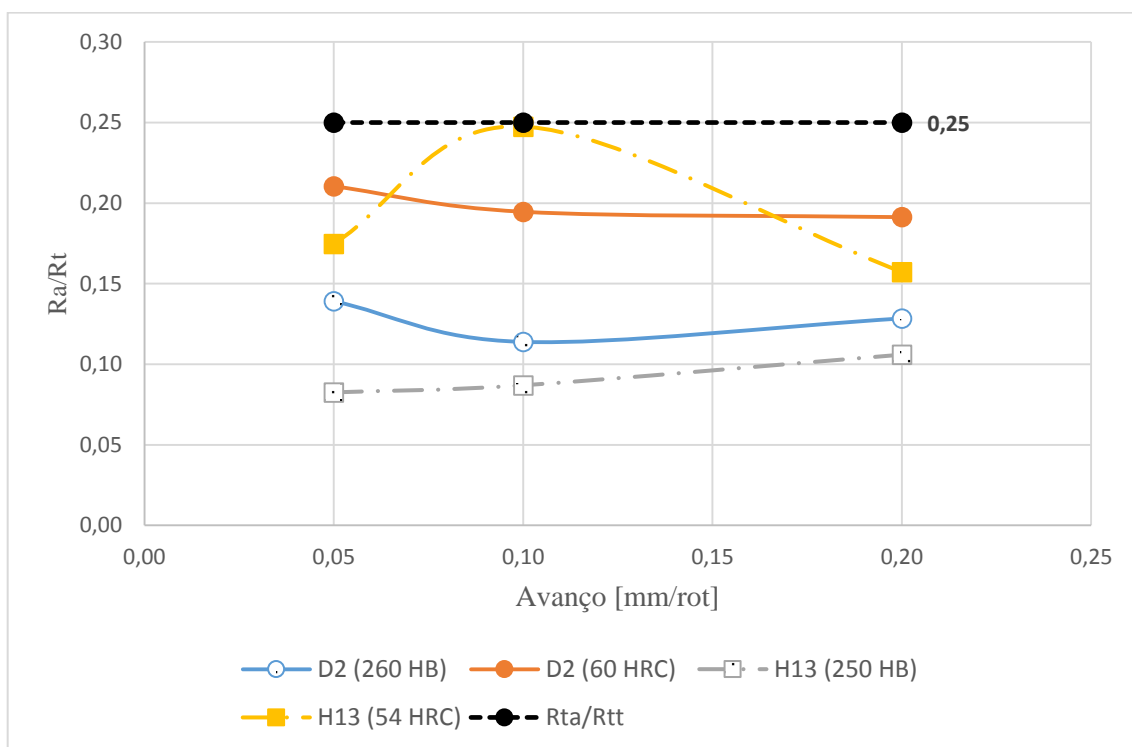
Os valores obtidos na Figura 4.4 situam-se entre os valores limite de IT1 e IT8 (1,5 e 39 μm respetivamente) ou seja, dentro dos limites de torneamento para acabamento exceto para o aço AISI H13 (250 HB). Também é possível observar-se que em nenhum dos ensaios realizados foram obtidos acabamentos superficiais correspondentes a elevada exatidão (que correspondem a valores de IT inferiores a 0,6 μm (IT1)).

Na Figura 4.4a) é possível verificar-se que o valor de IT aumenta com o avanço. Isto significa que quanto maior o avanço menor é a precisão dimensional obtida para as pastilhas cerâmicas com geometria convencional. Também é possível observar que quanto maior a dureza do aço a maquinar mais baixos são os valores do intervalo de tolerância. Com avanços de 0,05 mm/rot são obtidos valores de IT próximos de 5 μm (IT3) para o aço AISI D2 (60 HRC), aço de maior dureza no presente trabalho. Este grau de IT corresponde a boa precisão dimensional sendo a sua aplicação em instrumentos de verificação (calibres, padrões, etc.) e o processo de fabrico encontra-se na gama de polimento (Tabela A.III.3). Para avanços mais elevados (0,10 mm/rot e 0,20 mm/rot) são obtidos valores de IT entre 11 μm e 39 μm (IT5 e IT8). Estes graus de IT correspondem a uma precisão dimensional corrente e o processo de fabrico é considerado torneamento de acabamento.

Já na Figura 4.4b), contrariamente à Figura 4.4a), com o aumento do avanço diminuem-se os valores de IT. São obtidos valores compreendidos entre 4 e 25 μm (IT3 a IT7). Nas pastilhas de geometria *wiper*, para os aços AISI D2 (260 HB) e para o H13 (54 HRC), obtiveram-se valores correspondentes a construção mecânica de grande precisão nos avanços de 0,05 e 0,10 mm/rot. Para o avanço de 0,20 mm/rot todos os aços em estudo apresentaram valores iguais ou inferiores a 11 μm (IT5) sendo considerados estes valores para processo de polimento.



a) convencional



b) wiper

Figura 4.3 – Razão entre Ra e Rt em função do avanço para os diferentes aços.

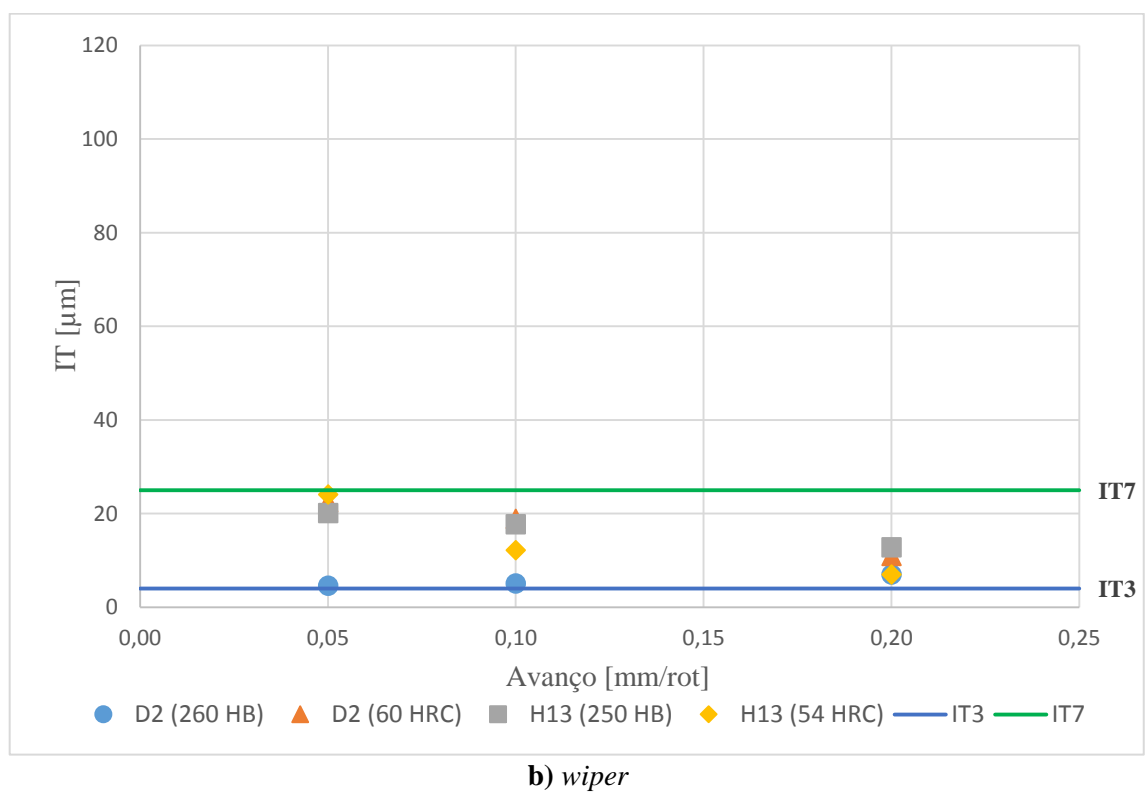
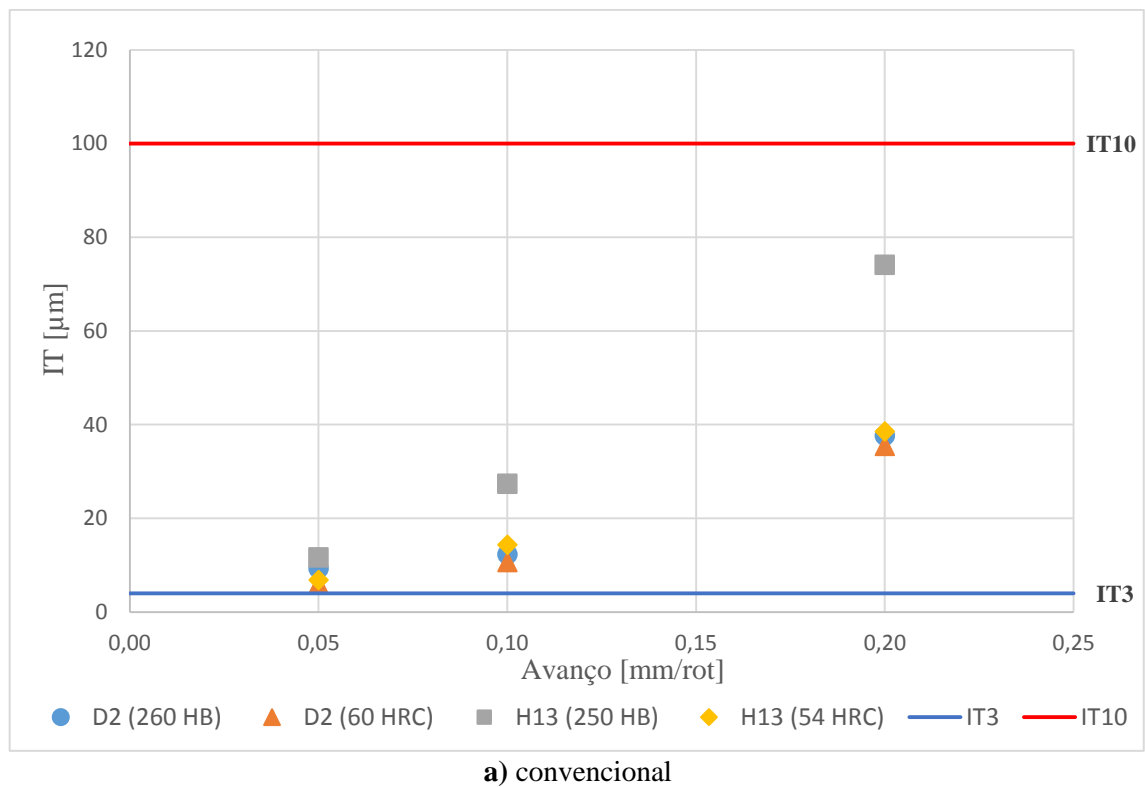


Figura 4.4 - Evolução de IT em função do avanço para a velocidade de corte (V_c) de 100 m/min nos diferentes aços.

4.1.2 Variação da velocidade de corte (V_C)

Assim como a profundidade de corte, a velocidade de corte não pertence às variáveis usadas no cálculo teórico da rugosidade (Equações 5 e 6). No entanto, como na presente dissertação o estudo foca-se essencialmente na influência do tratamento térmico e na comparação dos aços AISI H13 e D2 demonstram-se quais as velocidades de corte que devem ser utilizadas para obterem-se resultados satisfatórios no avanço de 0,10 mm/rot. A escolha deste avanço teve em conta ser o valor intermedio dos valores selecionados.

A Figura 4.5 mostra a evolução de R_a em função das diferentes velocidades de corte utilizadas na maquinagem dos aços em estudo, com o avanço fixo (a) de 0,10 mm/rot e, para a ferramenta cerâmica de geometria: a) convencional e b) *wiper*. Para além dos valores experimentais, é exibido o valor teórico (R_{ta}) obtido pela Equação 6.

Ao nível da velocidade de corte, esta tende a melhorar o acabamento superficial assim que aumenta. Para velocidades mais baixas dá-se a formação da aresta postiça de corte que causa a formação de partículas aderentes á superfície maquinada, degradando-a.

Da análise da Figura 4.5 é visível que a velocidade de corte tem muito menor influência na rugosidade do que o avanço, mantendo-se praticamente constante para toda a gama de velocidades testadas.

Na Figura 4.5a) verifica-se que os aços AISI D2 apresentam menores valores de rugosidades relativamente aos aços AISI H13, para as pastilhas convencionais. Dentro dos aços AISI D2 observa-se que o aço de dureza 60 HRC apresenta valores mais baixos de R_a para todas as gamas de velocidade testadas, sendo a velocidade de corte ótima de 100 m/min onde atingiram-se valores de R_a de 0,79 μm .

Como é possível observar-se na Figura 4.5b) não existe valor de rugosidade para a velocidade de corte (V_C) de 50 m/min para o aço AISI H13 (250 HB), isto deve-se há existência de irregularidades visíveis a olho nu, não procedendo-se assim a medições para não danificar o apalpador do rugosímetro. Verifica-se também que os valores obtidos são significativamente mais baixos que os das pastilhas de geometria convencional sendo também obtidos valores mais baixos para os aços AISI D2. Observa-se que contrariamente às pastilhas de geometria convencional, nas pastilhas de geometria *wiper*, dentro dos aços AISI D2, o que apresentou menores valores de R_a foi o de 260 HB.

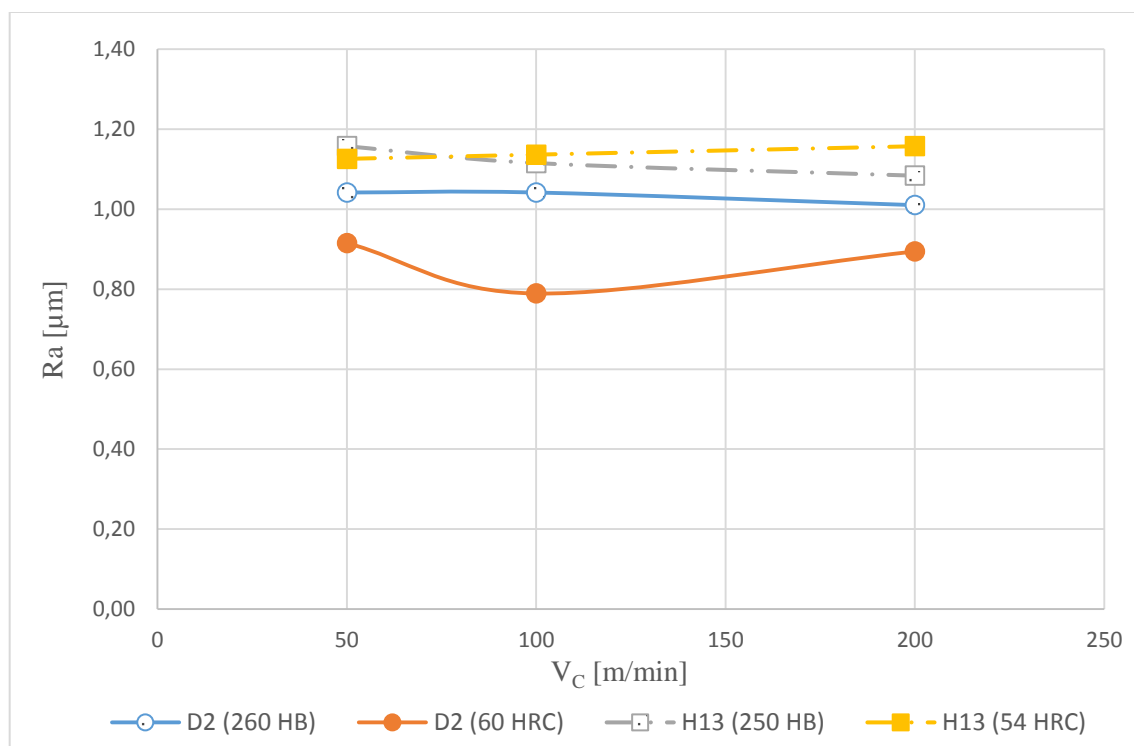
Comparando os valores das duas pastilhas verifica-se que os valores da pastilha convencional estão compreendidos entre 0,80 e 1,20 μm e da pastilha *wiper* encontram-se compreendidos entre 0,13 e 0,70 μm aproximadamente.

Na figura 4.6 é possível observar a evolução da amplitude máxima de rugosidade (R_t) em função da velocidade de corte (V_C) para o avanço fixo de 0,10 mm/rot nos aços em estudo, com a utilização da ferramenta cerâmica de geometria: a) convencional, b) *wiper*.

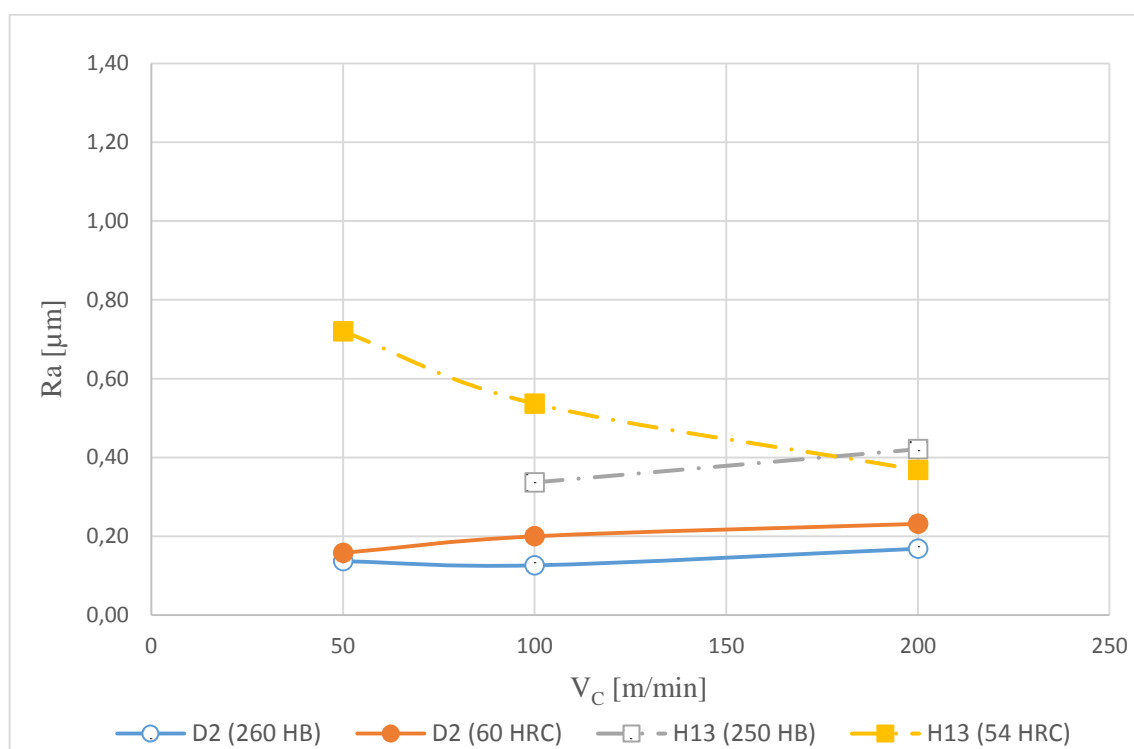
Como ilustra a Figura 4.6a) os aços AISI D2 apresentam menores valores de picos e vales de irregularidades. Para a velocidade de corte (V_C) de 200 m/min verifica-se que a resposta a irregularidades aproxima-se para todos os aços exceto para o AISI H13 (54 HRC).

Na Figura 4.6 b) mostra-se que para o aço AISI H13 (54 HRC) á um decréscimo acentuado de rugosidade da velocidade de corte (V_C) 50 m/min para a de 100m/min. Apesar de apresentar valores mais baixos de R_t , outro aspeto relevante que se observa é a variação de picos é mais salientada para as pastilhas *wiper*, isto deve-se ao fato que o aumento do raio de ponta da ferramenta torna-a mais resistente, porém acarreta um aumento da vibração devido ao maior atrito causado pela maior área de contato entre peça e ferramenta.

Da análise das Figura 4.6 verifica-se que o intervalo de R_t para as pastilhas convencionais encontra-se compreendido entre 3,77 e 5,60 μm e para as pastilhas *wiper* entre 1,12 e 4,29 μm .

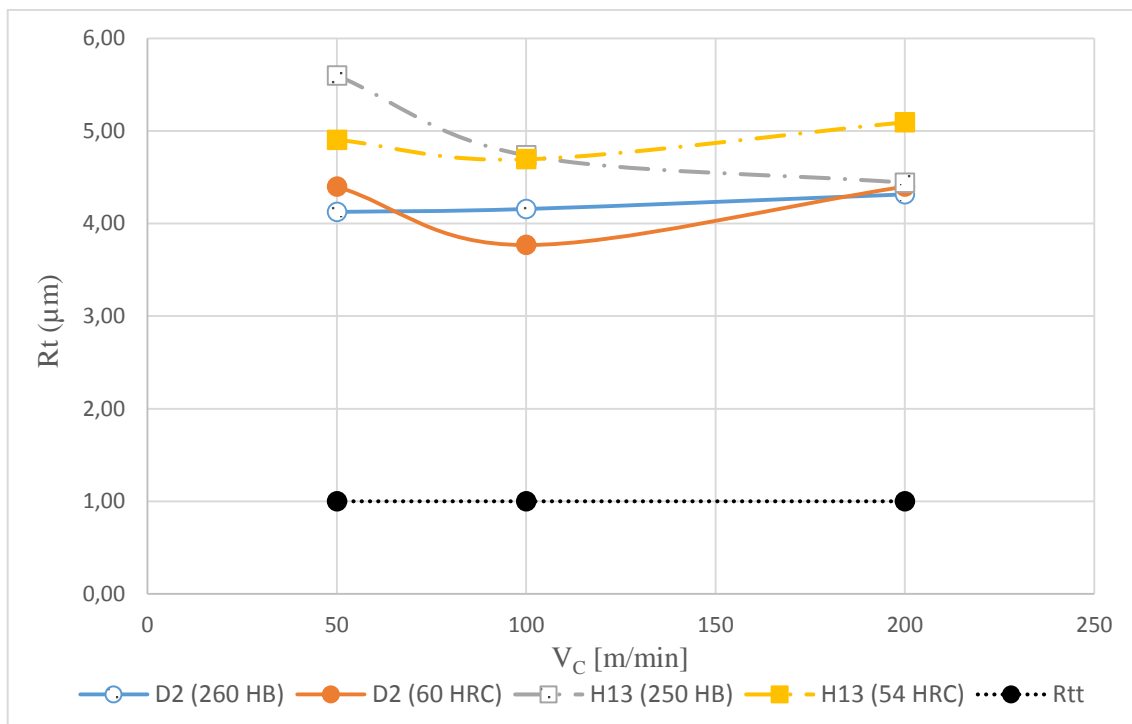


a) convencional

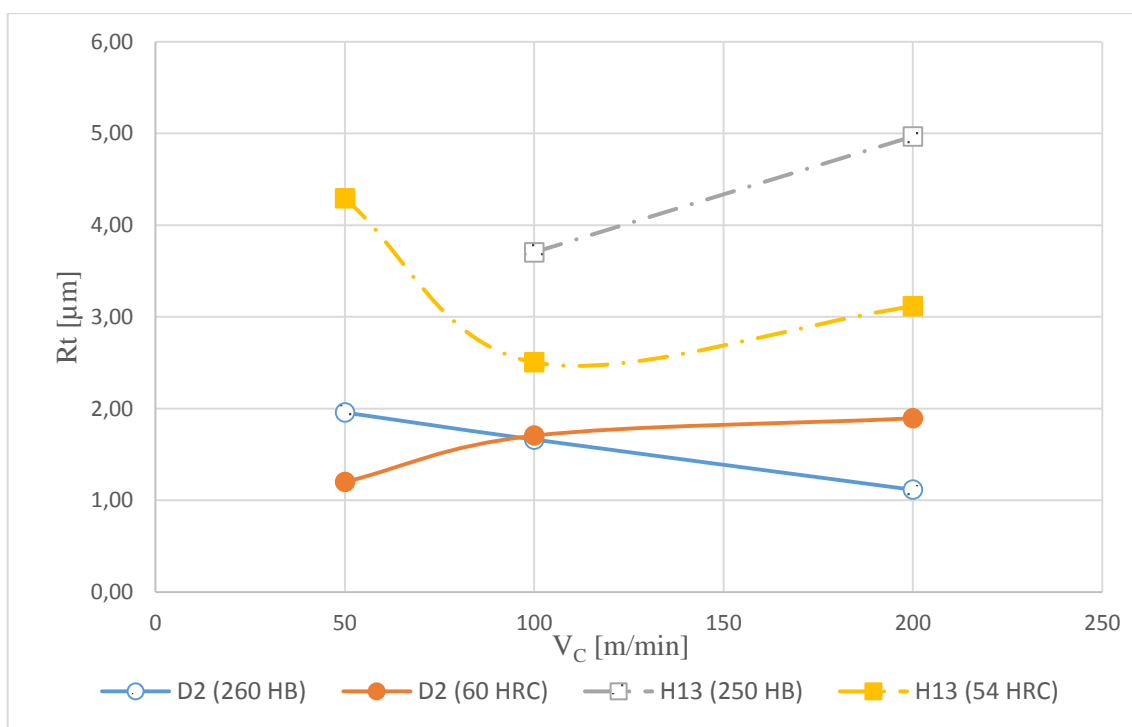


b) wiper

Figura 4.5 – Evolução da rugosidade média aritmética (Ra) em função da velocidade de corte (V_C) para o avanço fixo de 0,10 mm/rot nos diversos aços.

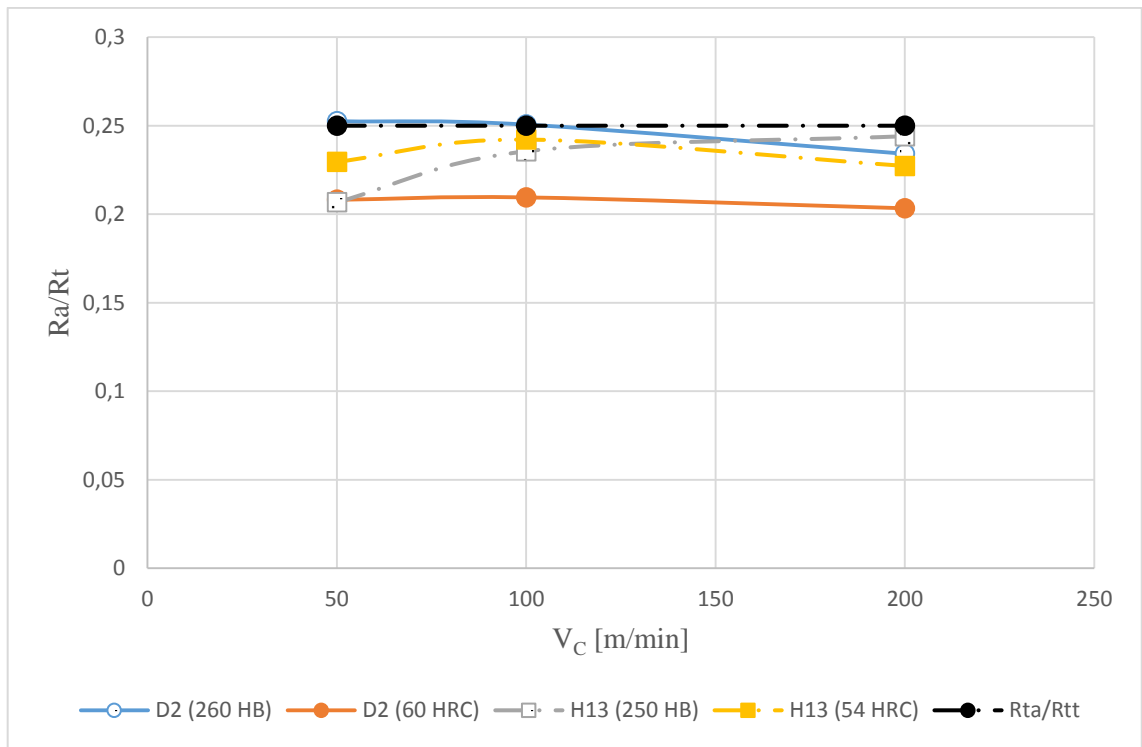


a) convencional

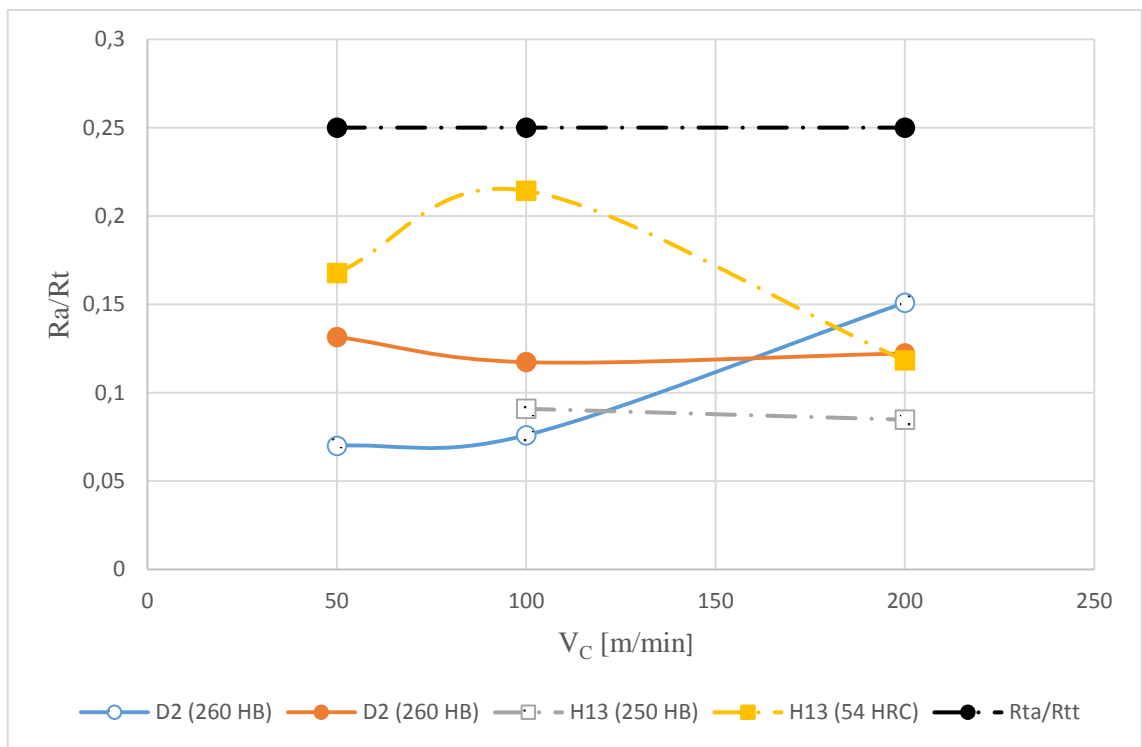


b) wiper

Figura 4.6 – Evolução da amplitude máxima de rugosidade (R_t) em função da velocidade de corte (V_C) para o avanço fixo de 0,10 mm/rot nos diferentes aços.

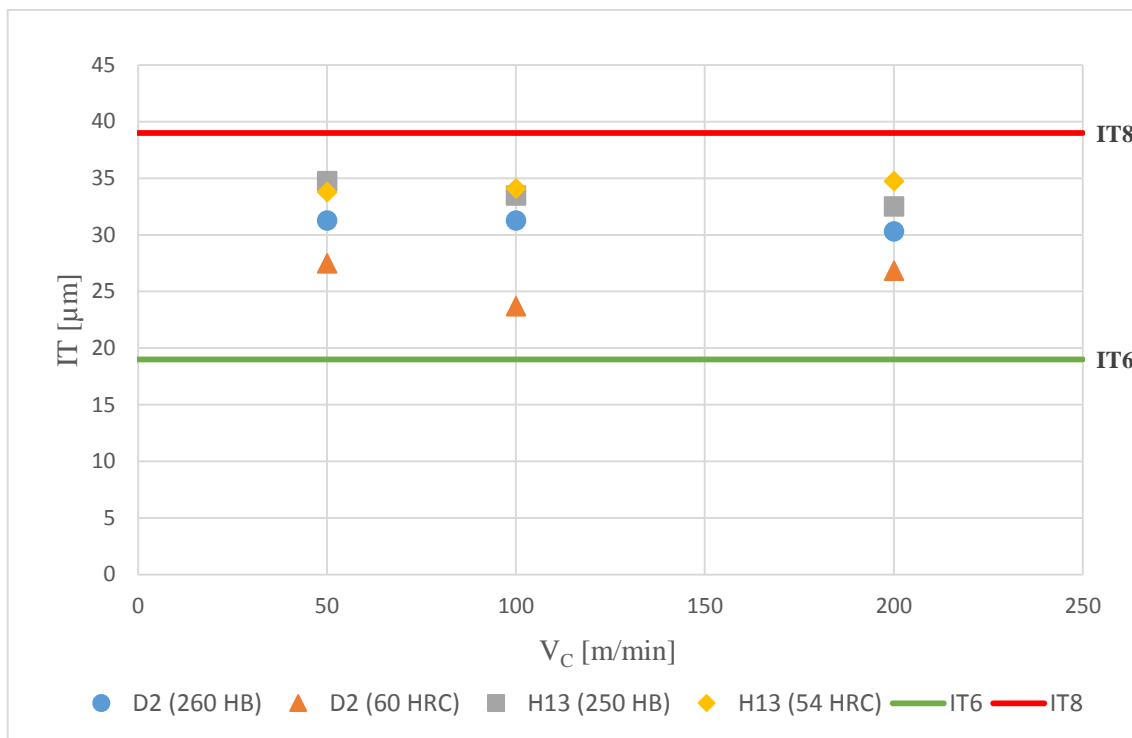


a) convencional

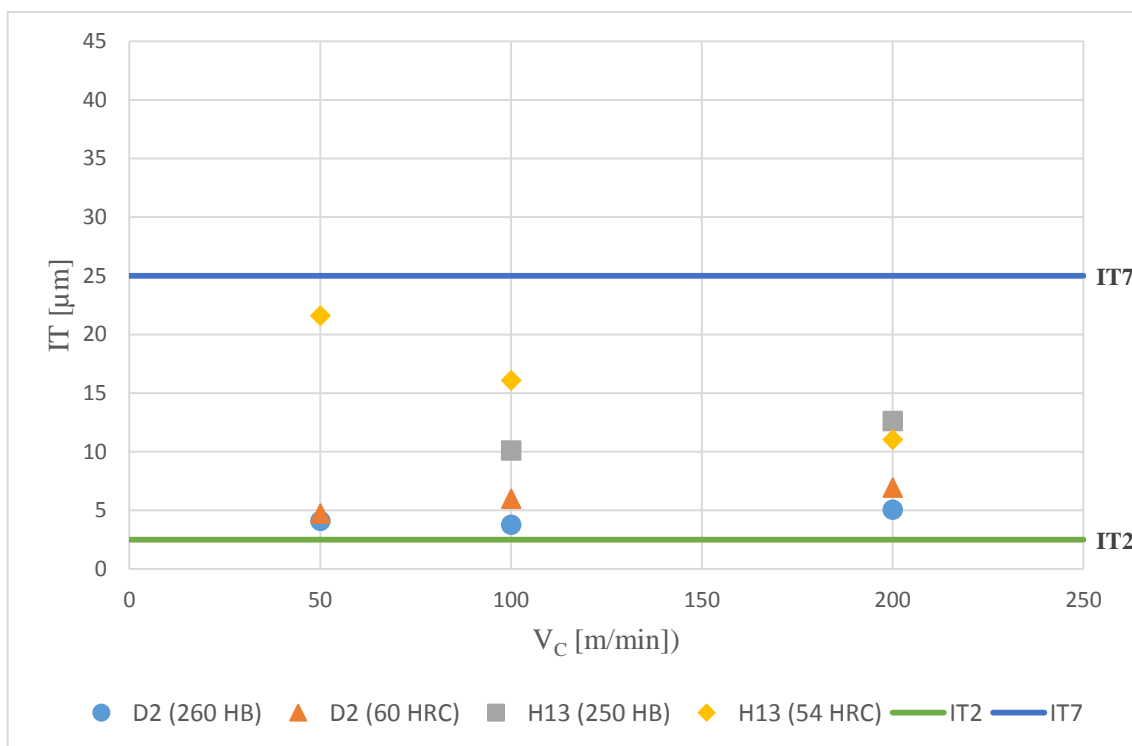


b) wiper

Figura 4.7 – Razão entre Ra e Rt em função da velocidade de corte (V_C) para os aços em estudo.



a) convencional



b) wiper

Figura 4.8 - Evolução de IT em função da velocidade de corte (V_C) para o avanço fixo de 0,10 mm/rot nos diferentes aços.

A Figura 4.7 ilustra a razão entre a rugosidade média aritmética e a amplitude máxima de rugosidade em função da velocidade de corte (V_C) nos aços em estudo.

Da análise da Figura 4.7a) vê-se que não existe grande variação na relação Ra/R_t nos aços em estudo sendo os valores obtidos próximos do valor teórico. Observa-se também que na velocidade de corte de 200 m/min a relação Ra/R_t aproxima-se do valor teórico quanto menor a dureza de aço a maquinar.

Da Figura 4.7b) verifica-se que a relação Ra/R_t aproxima-se mais do valor teórico para os aços tratados termicamente (maior dureza) contudo, os valores obtidos encontram-se afastados do valor teórico (0,25).

A representação da Figura 4.8 ilustra a evolução de IT em função da velocidade de corte (V_C) para o avanço fixo (f) de 0,10 mm/rot, com a ferramenta cerâmica de geometria: a) convencional, b) *wiper*.

Os valores obtidos na Figura 4.8 situam-se entre os valores limite de IT1 e IT8 (1,5 e 39 μ m respetivamente) para todos os aços em estudo.

Na Figura 4.8a) observa-se que o aço AISI D2 apresenta graus de tolerância mais baixos relativamente ao aço AISI H13. Dentro dos aços AISI D2 o aço com dureza 60 HRC mostra valores de IT mais baixos principalmente na velocidade de corte (V_C) de 100 m/min onde obtêm-se valores próximos de IT7 correspondentes a torneamento geral.

Da análise da Figura 4.8b) é visível que os aços AISI D2 apresentam grau de tolerância mais baixos comparativamente aos aços AISI H13. Para os aços AISI D2 são obtidos graus de tolerância compreendidos entre IT3 e IT4 que correspondem a uma utilização para instrumentos de verificação e a processos de fabrico de polimento. Os aços AISI H13 obtiveram valores de IT mais baixos para a velocidade de corte (V_C) de 200 m/min, atingindo-se nesta velocidade valores compreendidos entre IT5 e IT6 que correspondem a uma utilização para construção mecânica de grande precisão e a processos de torneamento de acabamento.

Verifica-se que são obtidos valores mais baixos nas pastilhas de geometria *wiper* relativamente às de geometria convencional atingindo-se os 2,5 μ m (IT2), aproximadamente, para o aço AISI D2 (260 HB) que corresponde a uma precisão dimensional muito boa.

4.2 TAXA DE PRODUÇÃO

Nesta secção da dissertação é analisada a rugosidade média aritmética em função da taxa de produção sendo que, esta análise tem grande importância principalmente numa pesquisa económica.

A Figura 4.9 apresenta a evolução da rugosidade média aritmética (Ra) em função da taxa de produção (T_p) para os aços em estudo comparando-se os valores obtidos nas pastilhas de geometria convencional e *wiper*.

Da análise da Figura 4.9 verifica-se que nas pastilhas de geometria convencional quanto maior a taxa de produção maiores são os valores de Ra e como consequência, mais fraco é o acabamento superficial obtido. Contrariamente às pastilhas convencionais, nas pastilhas *wiper* observa-se que quanto maior a taxa de produção mais baixos são os valores de Ra obtidos pois, como são pastilhas de raio múltiplo o seu funcionamento justifica-se para avanços elevados.

Observa-se que a variação de Ra é mais significativa nos aços não tratados termicamente (aços AISI D2 (260 HB) e AISI H13 (250 HB)) pois apresentam maiores variações da taxa de produção.

Para o aço AISI D2 (260 HB) verifica-se um ligeiro aumento de rugosidade quando aumenta-se a taxa de produção nas pastilhas *wiper* e, de acordo com Grzeski (2006) a recuperação elástica da superfície após a maquinação conduz a resultados de rugosidade mais elevados.

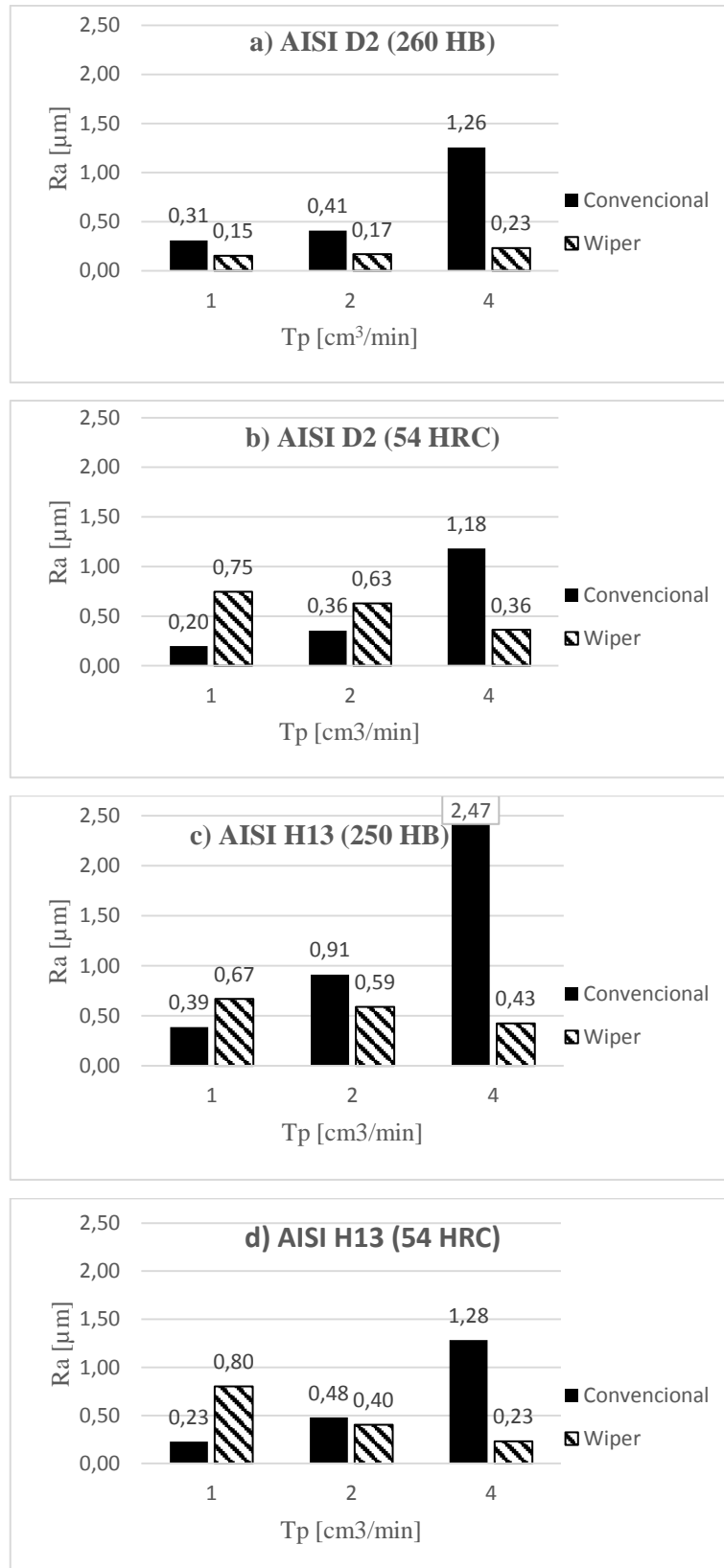


Figura 4.9 – Evolução da rugosidade media aritmética (Ra) em função da taxa de produção (Tp) nos diferentes aços.

Capítulo 5

Conclusões

5 CONCLUSÕES

Os ensaios experimentais de torneamento exterior a seco efetuaram-se utilizando provetes de aços AISI H13 e AISI D2, recorrendo a ferramentas de corte cerâmicas de geometria convencional e *wiper*.

A análise destes ensaios experimentais consistiu na avaliação do acabamento superficial e precisão dimensional com influência do tratamento térmico aplicado nos aços. Foi também analisada a taxa de produção para melhor compreensão entre as geometrias das pastilhas. Para estas análises registaram-se os valores Ra, Rt e IT.

Foram realizados dois tipos de ensaios. O primeiro consistiu em fixar a velocidade de corte (V_c) de 100 m/min e variar o avanço (f). O segundo consistiu em fixar o avanço de 0,10 mm/rot e variar a velocidade de corte.

Com base dos resultados obtidos e descritos no capítulo 4 da presente dissertação, são apresentadas as seguintes conclusões:

- Nas pastilhas de geometria convencional:
 - Os aços AISI D2 apresentam menores valores de rugosidade relativamente aos aços AISI H13. Dos aços AISI D2 o que apresentou melhor acabamento superficial foi o tratado termicamente de 60 HRC atingindo-se o valor de Ra de 0,20 μ m para o avanço de 0,05 mm/rot.
 - Na razão Ra/Rt os aços tratados termicamente apresentam valores mais próximos do valor teórico (0,25) sendo obtidos o valor de 0,21 para o aço AISI D2 tratado (60 HRC) e 0,22 para o aço AISI H13 tratado (54 HRC).
 - No aço AISI D2 (60 HRC) obtiveram-se valores de intervalos de tolerância próximos de IT3 que corresponde a uma grande precisão.
- Nas pastilhas de geometria *wiper*:
 - Verifica-se que os aços AISI D2 apresentam menores valores de Rt relativamente aos aços AISI H13. Na relação Ra/Rt observa-se que quanto maior a dureza mais próximos são os valores Ra e Rt entre si.
 - Na precisão dimensional obtiveram-se valores de IT3 correspondentes a grande precisão para os aços AISI H13 tratado (54 HRC).

A influência do tratamento térmico permitiu concluir que os aços tratados termicamente apresentam melhor acabamento superficial quando submetidos a ensaios de torneamento exterior. Conclui-se que os aços AISI H13 e D2 não tratados termicamente, apesar de possuírem praticamente a mesma dureza, possuem um comportamento em termos de acabamento/precisão diferentes, principalmente para avanços elevados.

Verificou-se que as pastilhas *wiper* são mais vantajosas relativamente às pastilhas convencionais pois apresentam valores de rugosidade mais baixos quando há um acréscimo do avanço. Conclui-se que as pastilhas *wiper* apresentam melhores resultados de rugosidade para avanços elevados sendo que, para avanços baixos apresentam valores mais altos que as pastilhas de geometria convencional.

Dos aços estudados, o aço AISI H13 tratado (54 HRC) foi o que apresentou melhor acabamento superficial para uma taxa de produção elevada.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Na sequência do trabalho realizado, na presente dissertação, poderão ser projetados novos desafios e desenvolvimentos no sentido de alargar os conhecimentos da maquinabilidade dos aços AISI H13 e D2:

- Testar outro tipo de ferramentas de corte, nomeadamente de CBN;
- Medir as temperaturas de corte recorrendo a diferentes técnicas;
- Medir as tensões residuais para avaliar a integridade superficial;
- Realizar ensaios de simulação numérica através do método dos elementos finitos e comparar com os resultados obtidos no presente trabalho;

Referências

REFERÊNCIAS

- ALTINTAS, Y. 2000. Mechanics of metal cutting. In: Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Nova Iorque: Cambridge University Press. p. 4-64.
- ARRAZOLA, P. J., ÖZEL, T., UMBRELLO, D., DAVIES, M. & JAWAHIR, I. S. 2013. Recent advances in modelling of metal machining processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 62, 695-718.
- ASM International. Metals Handbook Vol.1: Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys (1978), 9th Ed.
- BARTARYA, G.; CHOUDHURY, S.K. 2012. State of the art in hard turning. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 53 (1), 1-14.
- BENGA GC, ABRAO AM. 2003. Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools. J Mater Process Tech;143-144:237-41.
- BENHABIB, B. 2003. Machining. In: Manufacturing: Design, Production, Automation, and Integration. 1. ed. Nova Iorque: Marcel Dekker, p. 199-231.
- CERETTI, E., LUCCHI, M. & ALTAN, T. 1999. FEM simulation of orthogonal cutting: serrated chip formation. Journal of Materials Processing Technology, 95, 17-26.
- CHIAVERINI, V. 1979. Aços e ferros fundidos. 4ed, São Paulo: ABM, 504p.
- DAVIES, M. A.; BURNS, T. J.; SCHMITZ, T. L. 1999. High-Speed Machining Processes: Dynamic on Multiple Scales. Proceedings of the Dynamic and Control of Mechanical Processing Workshop, Budapest, p. 7-19.
- DAVIES, M.; PRATT, J.; DUTTERER, B.; BURNS, T. 2002. Regenerative Stability Analysis of Highly Interrupted Machining, Metal Cutting and High Speed Machining, Kluwer Academic/Plenum Publisher, p. 151-160.
- DAVIM, J.P e CORREIA, A.E. 2006. *Maquinagem a Alta Velocidade-Fresagem/CNC*. Publindústria, Edições Técnicas; Impressão Publidisa; pp 54-56.
- DAVIM, J.P, FIGUEIRA L. 2007. Comparative evaluation of conventional and wiper ceramic tools on cutting forces, surface roughness and tool wear in hard turning AISI D2 steel. J Eng Manuf.;221: 625-33.
- DESTEFANI, J. 2004. Technology key to mold making success. Manufacturing Engineering, 133 (4), 59-64.
- DEWES, R. C.; ASPINWALL, D. K. A review of ultra high speed milling of hardened steels. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 69, n. 1/3, p. 1-17, 1997.
- DINIZ, A.E.; FERREIRA, J.R.; TEIXEIRA FILHO, F. 2003. Influence of refrigeration/lubrication condition on SAE 52100 hardened steel turning at several cutting speeds. International Journal of Machine Tools and Manufacture, [S.l.], v. 43, p. 317-326.
- DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. 2013. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 8. ed. São Paulo: Artliber.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. 2010. "Tecnologia da Usinagem dos Materiais", 7.ed., Ed. Artiber, São Paulo, 262 p.
- DONACHIE, MATTHEW J. 2015.- Titanium: A Technical Guide, 2nd Edition. Disponível em WWW:<URL:https://www.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=HgzukknbnGAC&pgis=1>. ISBN 161503062X.

- ELBESTAWI, M.A.; CHEN, L.; BECZE, C.E.; EI-WARDANY, T.I. 1997. Highspeed milling of dies and molds in their hardened state. *Annals of CIRP*, 46, 57–62.
- EL HAKIM MA, SHALABY MA, VELDHUIS SC, DOSBAEVA GK. 2014. Effect of secondary hardening on cutting forces, cutting temperature, and tool wear in hard turning of high alloy tool steels. *Measurement*. doi:10.1016/j.measurement.2014.12.033
- EL-SONBATY, I.; KHASHABA, U. A.; MACHALY, T. 2004. - Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites. *Composite Structures*. . ISSN 02638223. 63:3-4 329–338. doi: 10.1016/S0263-8223(03)00181-8.
- EZUGWU, E. O. 2005. - Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. . ISSN 08906955. 45:12-13 1353–1367. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.02.003.
- FALLBÖHMER *et al.* 2000. High speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 98, n. 1, p. 104-115.
- FERRARESI, D. 1977. Fundamentos da usinagem dos metais. 5ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher.
- GAITONDE, V. N., KARNIK, S. R., FIGUEIRA, L. & PAULO DAVIM, J. 2009. Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27, 754-763.
- GEIER, M.; SOUZA, A. J. 2011. “Assessment of Surface Roughness in Dry Finish Turning Operations of AISI 4140 Steel Using Wiper Cutting Tools”. 21st International Congress of Mechanical Engineering (Annals of the XXI COBEM), Oct 24-28, Natal, RN.
- GRZESIK W., WANAT, T. 2006. “Surface Finish Generated in Hard Turning of Quenched Alloy Steel Parts Using Conventional and Wiper Ceramic Inserts”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 15, pp. 1988-1995.
- GRZESIK W. 2006., Determination of temperature distribution in the cutting zone using hybrid analytical-FEM technique. *Int J Mach Tools Manuf* 46: 651–658.
- GRZESIK W. 2008. Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools. *Wear*, 265, 327–335.
- GODOY, V.A.A.; DINIZ, A.E. 2011. Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology*, [S.l.], v.. 211, p. 1014-1025.
- HOSEINY, H. *et al.* 2012. - The effect of the martensitic packet size on the machinability of modified AISI P20 prehardened mold steel. *Journal of Materials Science*. . ISSN 0022-2461. 47:8 3613–3620. doi: 10.1007/s10853-011-6208-y.
- HU, H. J. & HUANG, W. J. 2014. Tool life models of nano ceramic tool for turning hard steel based on FEM simulation and experiments. *Ceramics International*.
- HUO, D.; CHENG, K. 2009. Basic concepts and theory. In: CHENG, K. (Ed.). *Machining Dynamics: Fundamentals, applications and practices*. Londres: Springer-Verlag. p. 7-20.
- HUGHES, JI. 2006. - The effect of cutting tool material and edge geometry on tool life and workpiece surface integrity. *Journal of Engineering Manufacture*. 220:2 93–107.
- IKUA, B.; TANAKA, H.; OBATA, F.; SAKAMOTO, S. 2002. *Study on Chatter Vibration in Ramping of Sculptured Surfaces Metal Cutting and High Speed Machining*, Kluwer Academic/ Plenum Publisher, p. 141-149.
- JIANXIN, D., TONGKUN, C. & LILI, L. 2005. Self-lubricating behaviors of Al₂O₃/TiB₂ ceramic tools in dry high-speed machining of hardened steel. *Journal of the European Ceramic Society*, 25, 1073-1079.

- KALPAKJIAN, S., SCHMID, S.R. 2010. “Manufacturing Engineering and Technology”, 6.ed., Ed. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1176p.
- KHANNA, NAVNEET; DAVIM, J. P. 2015. - Design-of-experiments application in machining titanium alloys for aerospace structural components. *Measurement*. . ISSN 02632241. 61:2015) 280–290. doi: 10.1016/j.measurement.2014.10.059.
- KIVAK, T. 2014. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement*, 50, 19-28.
- KLOCKE F, KRATZ H. 2005. Advanced tool edge geometry for high precision hard turning. *Annals of CIRP* 54/1:47–50
- KLOCKE, F. & KUCHLE, A. 2011. *Manufacturing Processes 1: Cutting*, Springer.
- KOMANDURI, R. & HOU, Z. B. 2001. A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology. *Tribology International*, 34, 653-682.
- KOSAKA, Y.; FANNING, JC; FOX, SP. 2004. - Development of low cost high strength alpha/beta alloy with superior machinability. *Proceedings of the 10th World Conference on Titanium*).
- KNIGHT, W. A. & BOOTHROYD, G. 2005. *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, Third Edition, Taylor & Francis.
- KUMAR AS, DURAI R, Sornakumar T. 2003. Machinability of hardened steel using alumina based ceramic cutting tools. *Int J Ref Met Hard Mat*; 21:109–17.
- MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. 1999. *Usinagem dos metais*. 4. ed. Uberlândia-MG: Editora da Universidade Federal de Uberlândia. 224p.
- MACHADO, Á.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; SILVA, M.B. 2009. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 1. ed. São Paulo: Blucher.
- MATSUMOTO, H.; DINIZ, A. E. 2000. Torneamento de aços endurecidos utilizando ferramentas cerâmicas. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA-CONEM, 1., Natal-RN. Anais... Natal-RN: UFRN.
- MELLO, M. S.; SOUZA, A. J.; GEIER, M. 2012. “Determinação Empírica dos Parâmetros de Rugosidade Ra e Rt Aplicando Ferramenta Alisadora no Torneamento a Seco de Acabamento do Aço AISI 4140”, 7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Anais do VII CONEM), 31 Jul - 03 Ago, São Luís, MA.
- OZEL, T., ALTAN, T. 2000. Determination of Workpiece Flow Stress and Friction at the Chip- Tool Contact for High-Speed Cutting, *International Journal Machine Tools &Manufacture*, p. 134 -152.
- ÖZEL, T., KARPAT, Y., FIGUEIRA, L. & DAVIM, J. P. 2007. Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 189, 192-198.
- PERVAIZ, SALMAN *et al.* 2014. - Influence of Tool Materials on Machinability of Titanium- and Nickel-Based Alloys: A Review. *Materials and Manufacturing Processes*. ISSN 1042- 6914. 29:3 219–252. doi: 10.1080/10426914.2014.880460.
- POULACHON, G., BANDYOPADHYAY, B.P., JAWAHIR, I.S., PHEULPIN, S., SEGUIN, E. 2003. The influence of microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. *Int. J. Mach. Tool. Manuf.* 43, 139–144.
- R. FERREIRA, D. CAROU, C. H. LAURO & J. P. DAVIM. 2016. Surface Roughness Investigation in the Hard Turning of Steel Using Ceramic Tools, *Materials and Manufacturing Processes*, 31:5, 648-652, DOI: 10.1080/10426914.2014.995051

- RASHID, A.; NICOLESCU, C. M. 2006. Active vibration control in palletised workholding system for milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 46, p. 1626- 1636.
- RECH, J.; MOISAN, A. 2003. Surface integrity in finish hard turning of case hardened steels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43, 543–550.
- ROBERTS, G. A.; CARY, R. A. 1992. *Tool Steel*, 4. ed., Ohio: Editora ASM. 820p.
- ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. 1998. *Tool steels*. 5. ed. ASM International, 335p.
- SANDVIK COROMANT - Turning tools SEMLITSCH,
- SANTOS *et al.* 2003. *Usinagem em altíssimas velocidades: como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal mecânica*. 1. ed., São Paulo: Editora Érica. 214 p.
- SCHEFFER, C.; HEYNS, P. S. 2005. Vibration-Based Tool Condition Monitoring Systems. In: DE SILVA, C. W. *Vibration and Shock Handbook*. 1.ed. [S.l.]: CRC Press. pp. 1-24.
- SCHULZ, H.; MORIWAKI, T. 1992. High speed machining. *Annals of the CIRP*, v. 41, n. 2, p. 637-643.
- SHALABY, M. A., EL HAKIM, M. A., ABDELHAMEED, M. M., KRZANOWSKI, J. E., VELDHUIS, S. C. & DOSBAEVA, G. K. 2014. Wear mechanisms of several cutting tool materials in hard turning of high carbon–chromium tool steel. *Tribology International*, 70, 148-154.
- SHIN *et al.* 2003. A new rapid manufacturing process for multi-face high speed machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 22, n. 1/2, p. 68-74.
- SILVA, L. R. 2002. Estudo da geometria da aresta de corte de ferramentas aplicadas ao torneamento de superligas à base de níquel com alta velocidade de corte. 211p. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.
- SOARES, P. 2009. In: SOARES, P. (ed.) *Aços Características, Tratamentos*. 6 ed. Porto: Publindústria.
- STEPHENSON, David A.; AGAPIOU, John S. 2015. - *Metal Cutting Theory and Practice*. Disponível em WWW:<URL:<https://www.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=PvK72Ymaj10C&pgis=1>>. ISBN 0824758889.
- TOH, C. K. 2004. Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel. *Precision engineering*.
- TONSHOFF, H.K, WOBKER HG, BRANDT D. 1996. Tool wear and surface integrity in hard turning. *Prod Eng*;3(1):19–24.
- TOTTEN G.E. 2006. *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*.
- UNGER, P. 2006. *Injection Molds 130 Proven Designs*. 4. ed. Cincinnati: Editora Hanser Gardner, 300p.
- WANIGARATHNE, P. C., KARDEKAR, A. D., DILLON, O. W., POULACHON, G. & JAWAHIR, I. S. 2005. Progressive tool-wear in machining with coated grooved tools and its correlation with cutting temperature. *Wear*, 259, 1215-1224.
- YEN Y., SOHNER J., LILLY B., ALTAN T. 2004. Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis, *Journal of Materials Processing Technology* 146: 82–91
- ZOU, J.M.; ANDERSON, M.; STAHL, J.E. 2004. Identification of cutting errors in precision hard turning process. *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154, 746–750.

Anexos

ANEXO I - SÍNTESE DE VÁRIOS ESTUDOS SOBRE OS VALORES DE RA OBTIDOS NOS AÇOS AISI H13 E D2.

Tabela A.I.1 – Estudos da maquinabilidade dos aços AISI H13 e D2.

Aço AISI	Ra [μm]	V _c [m/min]	f [mm/rot]	Tempo [min]	Autor
D2	0,16	150 wiper	0,05	5	V. N. Gaitonde (2009) Analysis of Machinability During Hard (ap=0,2)
	0,14			10	
	0,18			15	
	0,23		0,1	5	
	0,24			10	
	0,3			15	
	0,49		0,15	5	
	0,71			10	
	0,91			15	
	0,31	115 wiper	0,05	5	
	0,35			10	
	0,31			15	
	0,39		0,1	5	
	0,49			10	
	0,54			15	
	0,38		0,15	5	
	0,54			10	
	0,55			15	
D2	0,7	220 conv	0,15	15	J.G. Lima (Abril 2005) (ap=0,2 mm)
	0,41			5	
	0,54		0,1	15	
	0,52			5	
	0,34		0,05	15	
	0,31			5	
	0,81	150 conv	0,15	15	
	1			5	
D2	0,43	80 conv	0,05	5	Luis Figueira (2007) (ap=0,2)
	0,5			10	
	0,56			15	
	0,72		0,1	5	
	0,97			10	
	1,05			15	
	0,55		0,15	5	
	0,7			10	
	0,82			15	
	0,39	150 conv	0,05	5	
	0,5			10	

Aço AISI	Ra [μm]	V _c [m/min]	f [mm/rot]	Tempo [min]	Autor
	0,6		0,1	15	
	0,79			5	
	0,89			10	
	1,05			15	
	0,77		0,15	5	
	1,07			10	
	1,32			15	
	0,26	220 conv	0,05	5	
	0,46			10	
	1,4			15	
	0,59		0,1	5	
	0,98			10	
	1,38			15	
	0,88		0,15	5	
	1,31			10	
	1,48			15	
H13	0,21	80 conv	0,05	ap =0,2	Renato Ferreira
	0,54		0,1		
	2,36		0,25		
	0,11	80 wiper	0,05		
	0,09		0,1		
	0,47		0,25		
	0,23	160 conv	0,05		
	0,66		0,1		
	2,46		0,25		
	0,07	160 wiper	0,05		
	0,08		0,1		
	0,52		0,25		
	0,23	240 conv	0,05		
	0,62		0,1		
	2,36		0,25		
	0,12	240 wiper	0,05		
	0,14		0,1		
	0,42		0,25		
H13	0,28	150 conv	0,08	ap=0,3	Adem Çiçek (2013)
	0,62		0,12		
	1,1		0,16		
	0,12	200 conv	0,08		
	0,38		0,12		
	0,75		0,16		
H13	0,4	225 conv	0,1	ap=0,15	Paulo Campos (2015)

Aço AISI	Ra [μm]	V _C [m/min]	f [mm/rot]	Tempo [min]	Autor	
	1,72		0,25	ap=0,33		
	0,24		0,1			
	1,67		0,25			
	0,26	162,5 conv	0,05	ap=0,24		
	1,63		0,26			
	0,96		0,16	ap=0,39		
	0,54	225 wiper	0,1	ap=0,15		
	1,22		0,22			
	0,62		0,1	ap=0,33		
	0,89		0,22			
	0,31	162,5 wiper	0,05	ap=0,24		
	1,25		0,26			
	0,91		0,16	ap=0,39		

ANEXO II – CARACTERÍSTICAS DO TORNO CNC KINGSBURY MPH 50.

Tabela A.II.1 - Características do torno CNC Kingsbury MPH 50.

Torno CNC Kingsbury MHP 50	
Contraponto	
Diâmetro	72 mm
Acionamento	Hidráulico
Bucha	
Distância máxima entre bucha e contraponto	500 mm
Acionamento	Hidráulico
Diâmetro máximo da bucha	200 mm
Posicionamento Rápido dos Eixos	
Eixo X	10 m/min
Eixo Y	10 m/min
Torreta	
Ferramenta de corte (internas e externas)	12
Tempo de indexação	12 s
Outras características	
Velocidade máxima de rotação	4500 rpm
Potência máxima	25 cv
Controlador	Fanuc séries O-T
Peso	≈ 4 Ton
Distância longitudinal (eixo Z)	550 mm
Distância transversal (eixo X)	200 mm

ANEXO III – VALORES E CLASSES DE IT NORMALIZADOS, VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS E ERRO DOS APALPADORES.

Tabela A.III.1 - Valores de IT normalizados para um diâmetro nominal entre 30 e 50 mm.

IT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
μm	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600	2500	3900

Tabela A.III.2 - Valores de IT normalizados para um diâmetro nominal entre 50 e 80 mm.

IT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
μm	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900	3000	4600

Tabela A.III.3 - Classes de qualidade IT.

Aplicação das classes de tolerâncias fundamentais

Classe de Qualidade	Utilização
01 a 4	Instrumentos de verificação (calibres, padrões, etc.).
5 e 6	Construção mecânica de grande precisão.
7 e 8	Construção mecânica cuidada.
9 a 11	Construção mecânica corrente.
12 a 18	Construção mecânica grosseira (laminagem, estampagem, fundição, forjamento).

Processos de fabrico vs Classes de Tolerância

Processo	Qualidade IT										
	4	5	6	7	8	9	10	11			
Polimento											
Esmerilamento											
Torneamento para acabamento											
Rectificação											
Brochagem											
Mandrilagem											
Torneamento											
Boreamento											
Fresagem											
Furação											
Fundição injectada											

Tabela A.III.4 – Valores teóricos de R_t e R_a para os avanços e ferramentas seleccionadas.

Avanço (mm/rot)	Raio de ponta (mm)	R _{tt}	R _{ta}
0,05	0,8	0,25	0,0625
0,1		1	0,25
0,2		4	1

Tabela A.III.5 – Cálculo do erro apalpador 1.

	Teórico	Lido
Ra	3,05	2,32
Rz	9,88	7,58
Rt	9,99	7,54
Media	7,64	5,81

ERRO 23,91 %

Tabela A.III.6 – Cálculo do erro apalpador 2.

	Teórico	Lido
Ra	3,05	2,8
Rz	9,88	9,24
Rt	9,99	9,68
Media	7,64	7,24

ERRO 5,24 %

Tabela A.III.7 – Valores da taxa de produção (Tp).

Ap [cm]	f [cm/rot]	Vc [cm/min]	Tp [cm ³ /min]
0,02	0,005	10000	1
0,02	0,01	10000	2
0,02	0,02	10000	4
0,02	0,01	5000	1
0,02	0,01	10000	2
0,02	0,01	20000	4

Tabela A.III.8 - Parâmetros de rugosidade e IT obtidos com a velocidade de corte (V_c) fixa de 100 m/min com a ferramenta cerâmica de geometria convencional.

Material	Avanço [mm/rot]	Ra [μ m]	Rzd [μ m]	Rzi [μ m]	Rzj [μ m]	Rmd [μ m]	Rmj [μ m]	Rt [μ m]	Rq [μ m]	Rp [μ m]	IT [μ m]
D2 (260 HB)	0,05	0,24	1,79	1,83	1,90	2,40	2,50	2,52	0,31	1,50	
		0,25	1,80	1,81	1,88	2,10	2,32	2,16	0,31	1,16	
		0,26	1,85	1,88	2,13	2,02	2,96	2,08	0,32	0,94	
	Média	0,31	2,25	2,28	2,44	2,69	3,21	2,79	0,39	1,49	9,29
	Des. padr	0,01	0,03	0,04	0,14	0,20	0,33	0,23	0,01	0,28	
	0,10	0,33	2,26	2,32	3,76	2,58	4,90	2,60	0,42	0,88	
		0,34	2,30	2,32	2,52	2,46	2,80	2,54	0,42	1,06	
		0,32	2,30	2,30	3,65	2,32	4,58	2,42	0,41	1,04	
	Média	0,41	2,83	2,87	4,10	3,04	5,07	3,12	0,52	1,23	12,27
	Des. padr	0,01	0,02	0,01	0,69	0,13	1,13	0,09	0,01	0,10	
	0,20	1,00	4,96	5,02	5,24	5,08	5,44	5,10	1,22	2,62	
		1,04	5,04	5,10	5,32	5,14	5,56	5,18	1,27	2,68	
		1,00	4,93	4,98	5,17	5,10	5,34	5,26	1,21	2,64	
D2 (60 HRC)	0,05	0,16	1,08	1,13	1,23	1,12	1,30	1,24	0,20	0,56	
		0,16	1,06	1,09	1,19	1,10	1,34	1,14	0,20	0,50	
		0,16	1,03	1,06	1,18	1,06	1,34	1,10	0,20	0,50	
	Média	0,20	1,31	1,35	1,49	1,35	1,64	1,44	0,25	0,64	5,95
	Des. padr	0,00	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,07	0,00	0,03	
	0,10	0,30	1,70	1,72	1,85	1,80	1,96	1,86	0,36	0,92	
		0,27	1,68	1,71	1,90	1,86	2,22	1,88	0,34	0,84	
		0,29	1,74	1,81	4,51	1,84	4,82	1,96	0,36	0,94	
	Média	0,36	2,11	2,16	3,41	2,27	3,72	2,35	0,44	1,12	10,66
	Des. padr	0,02	0,03	0,06	1,52	0,03	1,58	0,05	0,01	0,05	
	0,20	0,98	4,35	4,42	4,51	4,58	4,64	4,82	1,16	2,44	
		0,95	4,18	4,23	4,34	4,30	4,46	4,32	1,12	2,10	
		0,93	4,11	4,14	4,30	4,24	4,42	4,42	1,10	2,26	
H13 (250 HB)	0,05	0,30	1,56	1,68	2,26	1,74	2,46	1,74	0,36	0,92	
		0,34	1,77	1,98	3,47	2,16	3,80	2,30	0,40	1,36	
		0,30	1,61	1,85	4,06	1,92	4,28	2,04	0,36	0,96	
	Média	0,39	2,04	2,28	4,04	2,40	4,35	2,51	0,46	1,34	11,65
	Des. padr	0,02	0,11	0,15	0,92	0,21	0,94	0,28	0,02	0,24	
	0,10	0,96	5,55	6,98	8,34	7,28	9,74	7,50	1,28	4,34	
		0,69	5,53	6,13	6,88	6,82	8,54	8,28	0,95	4,16	
		0,56	3,91	4,29	6,04	5,52	7,80	5,52	0,72	1,94	
	Média	0,91	6,19	7,19	8,78	8,10	10,77	8,80	1,22	4,31	27,38
	Des. padr	0,20	0,94	1,38	1,16	0,91	0,98	1,42	0,28	1,34	
	0,20	1,94	11,06	12,60	27,48	15,52	29,86	16,34	2,45	10,20	
		2,01	12,86	14,97	32,76	15,98	34,98	16,52	2,76	9,38	
		2,03	12,92	15,80	17,96	16,46	20,92	17,56	2,97	11,12	
H13 (54 HRC)	0,05	0,18	1,18	1,68	2,45	2,00	2,68	2,00	0,24	1,42	
		0,18	1,18	1,43	2,45	1,54	2,64	1,62	0,23	0,92	
		0,19	1,10	1,73	2,71	1,90	2,88	1,90	0,26	1,20	
	Média	0,23	1,43	2,00	3,14	2,25	3,39	2,28	0,30	1,46	6,82
	Des. padr	0,01	0,05	0,16	0,15	0,24	0,13	0,20	0,02	0,25	
	0,10	0,41	2,16	2,26	4,93	2,26	5,10	2,38	0,49	1,08	
		0,40	2,03	2,14	5,05	2,20	5,38	2,28	0,48	0,98	

	0,35	1,93	2,04	2,11	2,12	2,22	2,14	0,42	1,00	
Média	0,48	2,53	2,66	4,99	2,72	5,25	2,81	0,57	1,26	14,37
Des. padr	0,03	0,12	0,11	1,66	0,07	1,75	0,12	0,04	0,05	
	1,02	4,36	4,41	4,64	4,48	4,82	4,56	1,18	2,22	
0,20	1,03	4,36	4,41	4,66	4,44	4,82	4,56	1,19	2,24	
	1,06	4,52	4,56	4,74	4,72	4,98	4,72	1,22	2,26	
Média	1,28	5,47	5,53	5,80	5,63	6,04	5,72	1,48	2,78	38,54
Des. padr	0,02	0,09	0,09	0,05	0,15	0,09	0,09	0,02	0,02	

Valores médios com erro associado de apalpador 1.

Tabela A.III.9 - Parâmetros de rugosidade e IT obtidos com a velocidade de corte (V_c) fixa de 100 m/min com a ferramenta cerâmica de geometria *wiper*.

Material	Avanço [mm/rot]	Ra [μm]	Rzd [μm]	Rzi [μm]	Rzj [μm]	Rmd [μm]	Rmj [μm]	Rt [μm]	Rq [μm]	Rp [μm]	IT [μm]
D2 (260 HB)	0,05	0,13	0,80	0,86	1,63	0,90	1,80	0,92	0,16	0,44	
		0,12	0,74	0,82	1,06	0,86	1,12	0,86	0,15	0,44	
		0,12	0,75	0,82	1,60	0,86	1,72	0,88	0,14	0,42	
	Média	0,15	0,95	1,03	1,77	1,08	1,92	1,10	0,19	0,54	4,58
	Des. Padr	0,01	0,03	0,02	0,32	0,02	0,37	0,03	0,01	0,01	
	0,10	0,14	0,88	1,05	2,84	1,24	2,94	1,24	0,18	0,84	
		0,14	0,83	1,04	1,50	1,20	1,60	1,20	0,17	0,70	
		0,13	0,82	0,94	1,11	1,06	1,20	1,16	0,16	0,66	
	Média	0,17	1,04	1,25	2,25	1,45	2,37	1,49	0,21	0,91	5,08
	Des. Padr	0,01	0,03	0,06	0,91	0,09	0,91	0,04	0,01	0,09	
	0,20	0,19	1,21	1,27	1,57	1,40	1,68	1,40	0,24	0,66	
		0,18	1,18	1,27	1,50	1,44	1,66	1,44	0,23	0,74	
		0,19	1,22	1,26	1,54	1,46	1,84	1,52	0,23	0,90	
D2 (60 HRC)	0,05	0,63	2,44	2,76	5,29	2,98	5,62	3,22	0,71	1,66	
		0,59	2,25	2,51	6,07	2,60	6,36	2,64	0,66	1,42	
		0,59	2,40	2,60	3,06	2,64	3,22	2,74	0,67	1,42	
	Média	0,75	2,93	3,25	5,96	3,40	6,28	3,55	0,84	1,86	22,43
	Des. Padr	0,02	0,10	0,13	1,56	0,21	1,64	0,31	0,03	0,14	
	0,10	0,51	3,77	4,06	5,20	3,92	5,40	2,65	1,08	2,36	
		0,48	3,98	4,36	5,58	4,44	5,92	3,01	1,14	2,64	
		0,53	3,99	4,26	5,49	4,22	5,74	2,15	1,13	2,66	
	Média	0,63	4,85	5,24	6,72	5,20	7,05	3,23	1,38	3,16	18,83
	Des. Padr	0,03	0,12	0,15	0,20	0,26	0,26	0,43	0,03	0,17	
	0,20	0,29	1,32	1,38	1,69	1,42	1,78	1,52	0,34	0,74	
		0,30	1,34	1,49	1,85	1,60	2,20	1,62	0,34	0,76	
		0,29	1,32	1,43	1,85	1,42	2,00	1,46	0,33	0,70	
H13 (250 HB)	0,05	0,69	5,36	5,58	7,34	6,04	8,80	6,50	0,91	4,16	
		0,42	3,80	4,27	4,96	7,26	9,60	7,40	0,63	5,66	
		0,51	3,60	4,91	6,13	5,72	7,76	5,72	0,71	3,20	
	Média	0,67	5,27	6,10	7,61	7,86	10,80	8,10	0,93	5,38	20,07
	Des. Padr	0,14	0,96	0,66	1,19	0,81	0,92	0,84	0,14	1,24	
	0,10	0,40	3,62	4,43	5,32	5,80	6,84	5,80	0,58	3,82	
		0,37	2,80	3,30	4,06	4,00	4,70	4,00	0,49	1,84	
		0,66	4,36	5,24	11,44	6,64	14,50	6,64	0,87	4,26	
	Média	0,59	4,45	5,36	8,60	6,79	10,76	6,79	0,80	4,10	17,72
	Des. Padr	0,16	0,78	0,97	3,95	1,35	5,15	1,35	0,20	1,29	
	0,20	0,34	2,72	3,12	3,86	3,20	4,40	3,70	0,46	1,96	
		0,35	2,39	2,70	3,04	2,52	3,32	2,90	0,45	1,32	

		0,34	2,46	2,73	6,13	2,98	7,04	3,12	0,45	1,54	
	Média	0,43	3,13	3,53	5,38	3,59	6,10	4,01	0,56	1,99	12,76
	Des. Padr	0,01	0,17	0,23	1,60	0,35	1,91	0,41	0,01	0,33	
H13 (54 HRC)	0,05	0,63	2,78	3,20	6,28	3,94	6,58	4,06	0,74	2,76	
		0,63	2,66	3,21	6,33	3,38	6,56	3,64	0,75	2,20	
		0,68	2,81	3,20	5,25	3,40	5,42	3,40	0,80	1,96	
	Média	0,80	3,41	3,97	7,38	4,43	7,67	4,58	0,95	2,86	24,04
	Des. Padr	0,03	0,08	0,01	0,61	0,32	0,66	0,33	0,03	0,41	
	0,10	0,30	0,78	0,95	2,26	0,94	2,38	1,04	0,16	0,52	
		0,35	1,18	1,41	2,42	1,94	3,00	1,94	0,19	1,44	
		0,33	0,74	0,80	1,08	0,94	1,24	0,98	0,14	0,58	
	Média	0,40	1,12	1,31	2,38	1,58	2,73	1,64	0,20	1,05	12,14
	Des. Padr	0,03	0,24	0,32	0,73	0,58	0,89	0,54	0,03	0,51	
	0,20	0,19	1,00	1,06	1,73	1,12	1,90	1,22	0,23	0,60	
		0,19	0,98	1,05	1,33	1,30	1,44	1,30	0,22	0,76	
		0,18	0,93	0,99	1,26	1,04	1,40	1,04	0,21	0,52	
	Média	0,23	1,20	1,28	1,78	1,43	1,96	1,47	0,27	0,78	6,94
	Des. Padr	0,01	0,04	0,04	0,25	0,13	0,28	0,13	0,01	0,12	

Valores médios com erro associado de apalpador 1.

Tabela A.III.10 - Parâmetros de rugosidade e IT obtidos com o avanço (f) fixo de 0,10 mm/rot com a ferramenta cerâmica de geometria convencional.

Material	Vc [m/min]	Ra [μm]	Rzd [μm]	Rzi [μm]	Rzj [μm]	Rmd [μm]	Rmj [μm]	Rt [μm]	Rq [μm]	Rp [μm]	IT [μm]
D2	50	1,04	3,99	4,03	4,25	4,08	4,34	4,13	1,19	2,02	31,25
	100	1,04	3,98	4,05	4,50	4,19	4,74	4,16	1,18	2,04	31,25
	200	1,01	4,21	4,21	4,55	4,27	4,61	4,31	1,10	2,02	30,31
D2 Tratado	50	0,92	3,83	4,06	4,23	4,31	4,65	4,40	1,05	2,15	27,47
	100	0,79	3,53	3,65	3,84	3,77	4,06	3,77	0,92	1,68	23,68
	200	0,89	4,13	4,18	4,65	4,38	4,97	4,40	1,04	2,17	26,84
H13	50	1,16	5,15	5,28	5,94	5,47	6,19	5,60	1,34	2,80	34,73
	100	1,12	4,44	4,48	5,03	4,63	5,49	4,74	1,26	2,55	33,46
	200	1,08	4,36	4,38	4,78	4,44	5,07	4,44	1,24	2,25	32,52
H13 Tratado	50	1,13	4,63	4,67	5,10	4,86	5,28	4,90	1,29	2,34	33,78
	100	1,14	4,58	4,60	5,03	4,63	5,22	4,69	1,29	2,44	34,10
	200	1,16	4,71	4,80	5,71	4,86	6,04	5,09	1,30	2,69	34,73

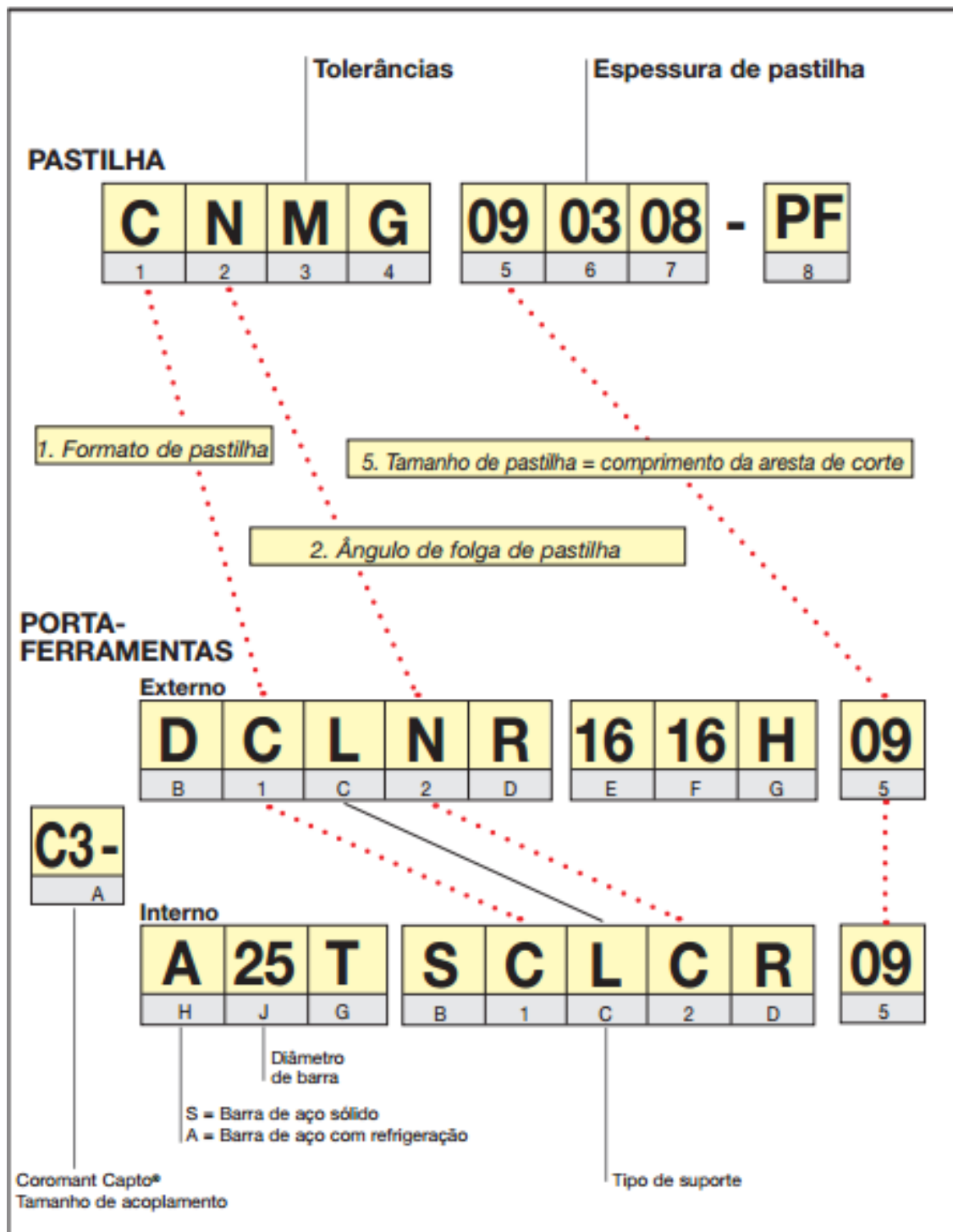
Valores com erro associado de apalpador 2.

































Tabela A.III.11 - Parâmetros de rugosidade e IT obtidos com o avanço (f) fixo de 0,10 mm/rot com a ferramenta cerâmica de geometria *wiper*.

Material	Vc [m/min]	Ra [μm]	Rzd [μm]	Rzi [μm]	Rzj [μm]	Rmd [μm]	Rmj [μm]	Rt [μm]	Rq [μm]	Rp [μm]	IT [μm]
D2	50	0,14	1,45	1,57	2,00	1,79	2,29	1,96	0,19	0,51	4,10
	100	0,13	1,14	1,27	1,56	1,52	1,77	1,66	0,16	0,51	3,79
	200	0,17	1,01	1,05	1,90	1,12	2,08	1,12	0,20	0,44	5,05
D2 Tratado	50	0,16	1,04	1,14	1,41	1,20	1,68	1,20	0,20	0,59	4,74
	100	0,20	1,39	1,52	1,62	1,54	1,83	1,70	0,25	0,86	6,00
	200	0,23	1,52	1,58	1,86	1,75	2,13	1,89	0,28	0,74	6,95
H13	50										
	100	0,34	2,33	3,19	5,60	3,47	6,08	3,70	0,45	2,46	10,10
	200	0,42	2,97	3,64	5,70	4,71	6,28	4,97	0,55	3,28	12,63
H13 Tratado	50	0,72	3,39	4,09	5,16	3,91	5,68	4,29	0,92	2,38	21,60
	100	0,54	2,17	2,39	3,05	2,50	3,18	2,50	0,61	1,39	16,10
	200	0,37	1,73	3,02	4,56	3,11	4,71	3,11	0,49	1,60	11,05

Valores com erro associado de apalpador 2.

ANEXO IV - DESCRIÇÃO DA REFERÊNCIA DAS PASTILHAS DE CORTE.



1. FORMATO DA PASTILHA							2. ÂNGULO DE FOLGA DA PASTILHA														
80° C 	55° D 	R 	S 	T 	35° V 	80° W 	 B	 C	 N												
4. TIPO DE PASTILHA				5. TAMANHO DE PASTILHA = COMPRIMENTO DA ARESTA DE CORTE																	
A 	G 	       <i>l mm:</i> 06–19 07–15 06–12 09–19 06–22 11–16 06–08																			
M 	T 																				
7. RAIOS DE PONTA																					
		04 $r_t = 0.4$	Recomendações de primeira escolha para o raio de ponta: <table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th style="text-align: center;">T-MAX P</th> <th style="text-align: center;">CoroTurn 107</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ACABAMENTO</td> <td style="text-align: center;">08</td> <td style="text-align: center;">04</td> </tr> <tr> <td>USINAGEM MÉDIA</td> <td style="text-align: center;">08</td> <td style="text-align: center;">08</td> </tr> <tr> <td>DESBASTE</td> <td style="text-align: center;">12</td> <td style="text-align: center;">08</td> </tr> </tbody> </table>								T-MAX P	CoroTurn 107	ACABAMENTO	08	04	USINAGEM MÉDIA	08	08	DESBASTE	12	08
										T-MAX P	CoroTurn 107										
		ACABAMENTO	08	04																	
		USINAGEM MÉDIA	08	08																	
DESBASTE	12	08																			
08 $r_t = 0.8$																					
12 $r_t = 1.2$																					
16 $r_t = 1.6$																					
24 $r_t = 2.4$																					
8. GEOMETRIA – OPÇÃO DO FABRICANTE																					
<p>O fabricante pode incluir mais dois símbolos ao código, para descrever a geometria da pastilha, por exemplo:</p> <p>-PF = ISO P Acabamento</p> <p>-MR = ISO M Desbaste</p>																					
B. SISTEMA DE FIXAÇÃO																					
D  <i>Fixação rígida (RC)</i>	M  <i>Fixação por cunha-grampo</i>	P  <i>Fixação por alavanca</i>	S  <i>Fixação por parafuso</i>																		
D. VERSÃO DA FERRAMENTA		E. ALTURA DA HASTE		G. COMPRIMENTO DE FERRAMENTA																	
R  <i>Versão direita</i>	 <i>h</i>		 <i>Comprimento da ferramenta = l₁ em mm</i>																		
L  <i>Versão esquerda</i>																					
N  <i>Neutra</i>	F. LARGURA DA FERRAMENTA									<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> H = 100 K = 125 M = 150 P = 170 Q = 180 R = 200 </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> S = 250 T = 300 U = 350 V = 400 W = 450 Y = 500 </td> </tr> </table>						H = 100 K = 125 M = 150 P = 170 Q = 180 R = 200	S = 250 T = 300 U = 350 V = 400 W = 450 Y = 500				
H = 100 K = 125 M = 150 P = 170 Q = 180 R = 200	S = 250 T = 300 U = 350 V = 400 W = 450 Y = 500																				
 <i>b</i>																					